



CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DE
LOS RECHAZOS SERPENTINÍTICOS
GENERADOS POR LA TECNOLOGÍA HPAL
EN MOA

Tesis presentada en opción al Título de Máster en Metalurgia

Autora: Ing. Adianes Ferrer Batista

Moa, 2024



**CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS
DE LOS RECHAZOS SERPENTINÍTICOS
GENERADOS POR LA TECNOLOGÍA
HPAL EN MOA**

Tesis presentada en opción al Título de Máster en Metalurgia

Autora: Ing. Adianes Ferrer Batista

Tutor: Prof. Titular. Ing. José Alberto Pons Herrera, Dr. C

Colaboradores: Prof. Titular. María Caridad Ramírez Pérez, Dr. C

Prof. Asist. Hugo Javier Angulo Palma. Dr. C

Moa, 2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los que directa e indirectamente han aportado al desarrollo de esta investigación.

- A mi tutor Dr. C José Alberto Pons Herrera que ha sido mi mentor en el desarrollo de mi tesis.
- A mis colaboradores Dr. C María Caridad Pérez Ramírez y al Dr. C Hugo Javier Angulo Palma y a todo el equipo de trabajo ya que gracias a ellos ha sido posible procesar las muestras.
- A las personas que estuvieron involucradas en la viabilizaron el trabajo realizado, al personal de la Empresa Moa Nickel S. A porque nos facilitaron las muestras y su transportación, en especial al M.Sc Eduardo Montero Gil, al CEDINIQ por su colaboración en la preparación y envasado de las muestras y al Combinado Mecánico por permitirnos realizar las pruebas a estos materiales en el taller de fundición.
- A la Revolución Cubana.
- A mi querida familia que ha sido mi motor impulsor.
- Al M.Sc Yuniór Correa Cala por compartir sus conocimientos, sus criterios, comentarios y recomendaciones han sido muy importantes para presentar un trabajo con mayor claridad y calidad.
- Al Ing. Oclides Carmenate Hechavarría por dedicarme parte de su tiempo y compartir sus valiosos conocimientos sobre geología.
- A los Dr. C Eulícer Fernández Maresma y Dr. C Edelio Danguillecourt Álvarez por sus comentarios enriquecedores que aportaron significativamente en el desarrollo de la investigación.
- A mi director científico en la Federación Rusa Doctor en Geología y Mineralogía Popov Yuri Vitalievich quien apoyara con el desarrollo las técnicas analíticas empleadas en la investigación y con sus acertadas recomendaciones en cuanto a los resultados que fueron procesados en los laboratorios del Instituto de Ciencias de la Tierra en Rostov del Don.
- A Yuri Talpa quien abrió las puertas del museo de ladrillos refractarios y realizara propuestas innovadoras para esta y futuras investigaciones.

- A los proyectos PS104HO001-019: Desarrollo de materiales refractarios y de construcción en la EMNi y PS104HO001-028: Desarrollo de nuevos materiales para la fundición y la construcción a partir de materias primas de la región de Moa que han financiado el desarrollo de la investigación.

Quiero expresar mis más sinceras disculpas a aquellos que, debido a la intensidad y complejidad de este proceso, no he podido nombrar. A todos llegue el más profundo reconocimiento por sus valiosos aportes y esfuerzos.

DEDICATORIA

- A mis padres: Zenaida Batista Labañino y Ángel Luis Azahares Lamorú.
- A mis sobrinos Dylan Durán Azahares y Alain Daniel Duran Azahares
- A mi querida prima Yunisley Matos Batista
- A mi hermana Anniela Azahares Batista

PENSAMIENTO

“Invertir en conocimientos produce siempre los mejores beneficios”

Benjamín Franklin

RESUMEN

Las principales características tecnológicas, físicas, químicas, mineralógicas y térmicas de los rechazos serpentiniticos, generados por la nueva planta de preparación de minerales de la Empresa Moa Nickel S.A, se exponen en este trabajo. Los resultados de la caracterización de estos Pasivos Ambientales Mineros – Metalúrgicos sólidos (PAMMs), demuestran las posibilidades de ser utilizados como materiales refractarios para los procesos de fundición (mezclas de moldeo y relleno para pinturas refractarias) probados en el taller de fundición de la EMNi. La fundamentación científica demuestra que la presencia significativa de los minerales de olivino, con predominio de los óxidos de magnesio y silicio y la fase forsterita estabilizada a los 818 °C, así como su similitud con minerales similares existentes en la región de Moa – Baracoa, las dunitas serpentinizadas, facilitan la toma de decisiones sobre su futuro uso industrial como material refractario. Los análisis térmicos confirman las etapas del proceso de descomposición térmica de este material, resumidas en: la eliminación del agua higroscópica, deshidroxilación y recristalización de los minerales de olivino presentes en esta materia prima.

Palabras clave: Rechazos serpentiniticos, Fundición, Arenas de moldeo, Pinturas refractarias

ABSTRACT

The main technological, physical, chemical, mineralogical and thermal characteristics of the serpentinitic rejects, generated by the new mineral preparation plant of the Company Moa Nickel S.A, are presented in this work. The results of the characterization of these solid Environmental Mining – Metallurgical Passives (PAMMs) demonstrate the possibilities of being used as refractory materials for casting processes (molding and filling mixtures for refractory paints) tested in the EMNi foundry workshop. The scientific foundation demonstrates that the significant presence of olivine minerals, with a predominance of magnesium and silicon oxides and the forsterite phase stabilized at 818 °C, as well as its similarity with similar minerals existing in the Moa - Baracoa region, the Serpentinized dunites facilitate decision making about their future industrial use as refractory material. Thermal analyzes confirm the stages of the thermal decomposition process of this material, summarized in: the elimination of hygroscopic water, dehydroxylation and recrystallization of the olivine minerals present in this raw material.

Keywords: Serpentinite rejects, Foundries, Molding sands, Refractory paints

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
ÍNDICE DE CONTENIDO	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XV
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XVI
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	XVII
INTRODUCCIÓN	1
Situación problemática	1
Planteamiento del problema.....	3
Objeto.....	3
Campo de acción.....	3
Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	4
Hipótesis	4
Aportes de la investigación.....	4
Resultados esperados	4
Estructura de la tesis	5
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.1 Términos y conceptos empleados en la investigación	6
1.2 Antecedentes y actualidad del tema.....	8
1.2.1 Antecedentes en el uso de los rechazos serpentínicos	9
1.2.2 Referentes teóricos de la investigación.....	11
1.3 Caracterización de los rechazos serpentínicos.....	13

1.4	Impacto ambiental y sostenibilidad de los rechazos serpentínicos.....	19
1.5	Características de la nueva planta de pulpa de la Empresa Moa Nickel S.A.....	22
1.6	Conclusiones del capítulo 1	24
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN		25
2.1	Localización de los rechazos serpentínicos	25
2.2	Selección y preparación de las muestras.....	26
2.3	Metodología de la investigación empleada.....	28
2.4	Técnicas analíticas empleadas	28
2.4.1	Análisis químico	28
2.4.2	Análisis granulométricos	28
2.4.3	Análisis mineralógico	29
2.4.4	Análisis térmico	30
2.4.5	Equipos auxiliares utilizados en la investigación	32
2.5	Métodos de investigación empleados	36
2.6	Obtención y procesamiento de las informaciones	37
2.7	Materiales empleados para la producción de los materiales refractarios.....	37
2.7.1	Materiales empleados para las pinturas refractarias	37
2.7.2	Materiales empleados para la fabricación de las mezclas de moldeo	38
2.8	Conclusiones del capítulo 2	40
CAPÍTULO 3. PARTE EXPERIMENTAL		41
3.1	Procedimiento para la fabricación de las pinturas refractarias	42
3.2	Procedimiento para la fabricación de las mezclas de moldeo.....	45
3.3	Conclusiones del capítulo 3	46
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....		47
4.1	Resultados de los análisis químicos, físicos, mineralógicos y térmicos	47
4.1.1	Resultados de los análisis químicos.....	47
4.1.2	Resultados de los análisis granulométricos.....	49

4.1.3	Resultados de los análisis mineralógicos	50
4.1.4	Resultados de los análisis térmicos	53
4.2	Resultados de la caracterización tecnológica del relleno para pintura refractaria ...	55
4.3	Resultados de la caracterización tecnológica como mezclas de moldeo	56
4.4	Procedimiento para el tratamiento de los rechazos serpentínicos	57
4.5	Conclusiones del capítulo 4	60
CONCLUSIONES GENERALES		61
RECOMENDACIONES		62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		63
ANEXOS		70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las principales arenas empleadas en la fundición de piezas.....	7
Tabla 2. Composición química de los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL.....	15
Tabla 3. Composición mineralógica de los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL.	16
Tabla 4. Composición térmica de los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL	17
Tabla 5. Principales características técnicas del difractor DRON - 7	30
Tabla 6. Datos técnicos del equipo de análisis térmico, STA 449 C.....	32
Tabla 7. Requisitos o parámetros que deben cumplir las mezclas de moldeo	45
Tabla 8. Composición química del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL, (en %). ..	47
Tabla 9. Composición química de las dunitas serpentinizadas de las zonas Merceditas y Amores y de los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL.....	48
Tabla 10. Resultados del análisis granulométrico realizado a los rechazos serpentínicos estudiados, luego de la preparación mecánica	49
Tabla 11. Pérdida de masa del proceso de descomposición térmica de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa y los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL ..	55
Tabla 12. Propiedades de las mezclas preparadas con los rechazos serpentínicos de tecnología HPAL.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Materiales de construcción elaborados con rechazo serpentinitico de la Empresa Pedro Soto Alba de Moa.	9
Figura 2. Posibilidad de funcionamiento de la economía circular con el uso de los rechazos serpentiniticos.	21
Figura 3. Instalaciones de la nueva planta de pulpa y muestras de investigación seleccionadas	22
Figura 4. Localización de la zona de estudio.....	25
Figura 5. Rechazo serpentinitico de la nueva planta de pulpa de Moa Nickel S.A.....	26
Figura 6. Esquema para el procesamiento de los rechazos serpentiniticos de la Empresa Moa Nickel S. A.....	27
Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos.....	28
Figura 8. Equipamiento empleado para el análisis granulométrico a) Tamizadora marca Filtra b) juego de tamices empleados en la investigación	29
Figura 9. Difractómetro de Rayos X DRON – 7 empleado para los análisis mineralógicos..	29
Figura 10. Equipo NETZSCH, utilizado para realizar el análisis térmico.	31
Figura 11. Trituradora de mandíbulas empleada para la trituración de los rechazos serpentiniticos.	33
Figura 12. Molino de bolas empleado para la molienda de los rechazos serpentiniticos.	33
Figura 13. Bandas transportadoras para el traslado de los rechazos serpentiniticos hasta la trituradora.....	34
Figura 14. Juego de tamices empleados en la investigación, según serie de Taylor.....	35
Figura 15. Permeámetro para determinar la permeabilidad en las mezclas de moldeo obtenidas a partir de rechazos serpentiniticos.....	35
Figura 16. Máquina de compresión para evaluar la resistencia de compresión de las mezclas de moldeo.....	36
Figura 17. Proceso de obtención y preparación de las resinas de pino, empleada en la investigación.	38
Figura 18. Equipos empleados en el CEDINIQ para la clasificación de los rechazos serpentiniticos.	41
Figura 19. Esquema para la preparación de los materiales refractarios.....	42

Figura 20. Aplicación de las pinturas preparadas a base de rechazo serpentínico, en los moldes de bomba de hierro fundido.....	44
Figura 21. Aplicación de pinturas a base de rechazo serpentínico, en los moldes de los brazos de hornos de reducción de acero HK-40.	44
Figura 22. Bomba pintada empleando como relleno el rechazo serpentínico de la tecnología HPAL	56
Figura 23. Esquema para el tratamiento de los rechazos serpentínicos como material refractario.....	57

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Características granulométricas del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL	50
Gráfico 2. Difractograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL, empleado como arena de moldeo	51
Gráfico 3. Difractograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL, empleado como relleno para pintura refractaria	51
Gráfico 4. Termograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL.....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Productos obtenidos: arena de moldeo (a) y relleno para pintura (b)	70
Anexo B. Relleno para pinturas antiadherente obtenido, a partir de los rechazos serpentínicos de las empresas Moa Nickel.	71

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

CT: Características tecnológicas

HPAL: Tecnología de lixiviación ácida a presión

PAM: Pasivos Ambientales Mineros

PAMMs: Pasivos Ambientales Mineros-Metalúrgicos sólidos

ECG: Empresa productora de níquel, Ernesto Che Guevara

CARON: Tecnología de Lixiviación Carbonato Amoniacal de producción de Níquel y Cobalto.

EMNi: Empresa Mecánica del Níquel.

CEDINIQ: Centro de Investigaciones del Níquel.

CTDMC: Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción.

UEB: Unidad Empresarial de Base.

An: Fase mineralógica Antigorita.

Liz: Fase Lizardita.

Cris: Fase Crisotilo.

Fo: Fase Forsterita.

Fa: Fase Fayalita.

MPa: Mega pascal (unidad de medida de la presión).

INTRODUCCIÓN

Situación problemática

La sostenibilidad en la industria ha cobrado una importancia crítica en las últimas décadas, impulsada por la creciente preocupación por el impacto ambiental de la actividad humana. En este contexto, los materiales refractarios se han convertido en un componente esencial en diversas aplicaciones industriales, especialmente en la metalurgia, donde se requiere resistencia a altas temperaturas y condiciones extremas, (Maza Vivanco, 2024). Sin embargo, la producción de estos materiales a menudo depende de recursos minerales que son limitados y costosos, lo que plantea un desafío significativo para la sostenibilidad industrial.

Cuba, con su rica geología y abundantes depósitos de minerales ultramáficos, se presenta como un escenario ideal para abordar este desafío, los cuales se localizan principalmente en el cinturón septentrional y dentro de este adquiere un relevante papel la llamada faja ofiolítica Mayarí – Baracoa, (Iturralde -Vincent, 1994). Ubicados en el macizo montañoso, Mayarí – Moa – Baracoa; donde se destacan grandes reservas de minerales de cromo y ferroniquelíferos, que han sido explotadas durante más de 100 años, quedando así diferentes residuos mineros metalúrgicos que constituyen en la actualidad pasivos ambientales mineros metalúrgicos – sólidos (PAMMs), (Domínguez Carretero & Proenza Fernández, 2024).

En la región de Moa se forman importantes depósitos de minerales con excelentes propiedades que pueden ser empleados como material refractario, pigmentos y aislantes térmicos, (Jerez, Leyva, & Pons, 1995); (Leyva, 1995); (Pons Herrera, Leyva, & Cobas, 1995).

El desarrollo alcanzado en esta región en ramas tan importantes como la geología, la minería y la metalurgia, facilita los procesos de prospección, extracción, preparación, transportación y explotación de los variados recursos con que cuenta el municipio y que, en su mayoría, no son aprovechados eficientemente, (Pons Herrera & Leyva Rodríguez, 1996).

Las empresas en operación ubicadas en Moa, explotan de una manera selectiva y procesan lateritas niquelíferas con proporciones diversas de la mena saprolítica, las plantas metalúrgicas encargadas emplean tecnologías diferentes; una de lixiviación ácida a presión (HPAL, por sus siglas en inglés) y el otro carbonato amoniacal (Proceso CARON).

La lixiviación ácida a presión (HPAL) se ha consolidado como un método eficaz para maximizar la recuperación de metales valiosos (níquel y cobalto) a partir de minerales

ultramáficos. Sin embargo, este proceso también genera cantidades considerables de residuos que, aunque son considerados un problema ambiental, poseen características que pueden ser aprovechadas en diversas aplicaciones industriales, (Kattel, 2017). En particular, los rechazos serpentiniticos resultantes del proceso HPAL son ricos en sílice (SiO_2) y óxido de magnesio (MgO), lo que les confiere propiedades que los hacen aptos para su uso como material refractario.

El potencial uso de los rechazos serpentiniticos es fundamental para desarrollar estrategias efectivas que permitan su valorización. Estudios previos han demostrado que estos materiales pueden ser utilizados como sustitutos en la fabricación de hormigones, mezclas asfálticas y otros productos, (Lara Negronis, (2018); Herrera Casas, (2018); Kattel, (2017)), estos autores se basaron en las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, así también en la valoración técnica de los mismos.

Por ejemplo, se ha encontrado que los hormigones elaborados con estos rechazos pueden alcanzar resistencias adecuadas para aplicaciones estructurales (López Peña, 2006). Sin embargo, es necesario llevar a cabo una caracterización exhaustiva para garantizar su desempeño adecuado en condiciones industriales.

La utilización de los rechazos serpentiniticos se ha usado como material de construcción alternativo según refieren, (Terrero Aguirre, 2011); (Gámez Matos, 2011), mientras que el uso como árido fino asfáltico en Moa fue propuesto por, (Bautista Zamora, 2017) quien realizara una evaluación de los desechos serpentiniticos y desechos de arenas de sílice. Por otra parte, Ganesh Persaud, (2014) propone una "Metodología para el inventario de los pasivos ambientales mineros-metalúrgicos, generados por las industrias del Níquel en Moa donde plantea que:

Posibles usos: Recuperación de elementos valiosos que puedan incorporarse al proceso metalúrgico de sus plantas. Material de construcción. Material refractario aprovechando los altos contenidos de SiO_2 y MgO , principalmente. Medidas a tomar en su rehabilitación: Aprovechando los contenidos de SiO_2 y el MgO pueden ser empleados en la fabricación de refractarios, como material de construcción. También pueden ser recuperados los elementos valiosos e incorporar a la planta.

Aunque en Cuba se han utilizado los rechazos serpentiniticos como material de la construcción, su uso no ha sido difundido como material refractario, sin embargo, en trabajos previos se ha investigado la formación de forsterita a partir de serpentinas. Se conoce por experiencias en otros países como España, el caso de la Serpentina del Barranco de San Juan,

(Aleixandre Ferrandis & González Peña, 1972) la posibilidad de utilizar algunos de los productos obtenidos como refractarios de forsterita de gran interés industrial.

En este contexto, la industria de fundición en Cuba se enfrenta un desafío significativo debido a la dependencia de arena de sílice como materia prima principal para la elaboración de moldes. Este material, esencial para la producción de componentes metálicos, debe ser transportado desde las provincias occidentales, lo que incrementa considerablemente los costos operativos. La necesidad de encontrar alternativas más económicas y sostenibles se hace evidente, especialmente en un contexto donde los recursos son limitados y la eficiencia económica es crucial.

De esta forma, hemos comprobado, que la situación problemática de esta investigación, está muy vinculada al insuficiente estudio de las características tecnológicas de los rechazos serpentínicos generados por la tecnología de producción de níquel (HPAL) en Moa, así como en su uso como material refractario en los talleres de fundición, ante las grandes acumulaciones de estos rechazos sin una utilidad definida.

Planteamiento del problema

Insuficiente conocimiento de las características tecnológicas de los rechazos serpentínicos generados por la tecnología de producción de Ni + Co (HPAL) en Moa, que limitan su posible utilización como material refractario en la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi).

Objeto

Rechazo serpentínico de la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa.

Campo de acción

Características tecnológicas del rechazo serpentínico generado por la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa.

Objetivos

Objetivo general

Determinar las características tecnológicas de los rechazos serpentínicos generados por la tecnología HPAL en Moa, y evaluar su desempeño como material refractario (arena de moldeo y relleno para pintura refractaria), en el taller de fundición de la EMNi.

Objetivos específicos

1. Caracterizar desde el punto de vista químico, físico, mineralógico y térmico los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa.
2. Caracterizar tecnológicamente el rechazo serpentinitico según las exigencias de su uso como material refractario.
3. Evaluar el uso de los rechazos serpentinitico de la empresa Moa Nickel S.A como material refractario (arena de moldeo y relleno para pintura refractaria), en el taller de fundición de la EMNi.
4. Desarrollar un procedimiento para el tratamiento y uso del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa a partir de los resultados de esta investigación.

Hipótesis

Con la determinación de las características tecnológicas del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa, será posible demostrar científicamente el uso de este como material refractario, en el taller de fundición de la EMNi.

Aportes de la investigación

Social: ayudaría al desarrollo de la sociedad con nuevos materiales para la fabricación de piezas mediante el proceso de fundición.

Ambiental: daría tratamiento a unos de los residuales generados por la industria Moa Nickel S.A, al reciclar estos residuos, se contribuye a la reducción de pasivos ambientales y se promueve una economía circular.

Práctico: contribución de una estrategia para la utilización del rechazo serpentinitico como material refractario, su incorporación en las mezclas de moldeo y pinturas refractarias puede mejorar la eficiencia del proceso productivo y reducir costos operativos.

Metodológico: conformación de una metodología para el tratamiento y uso del rechazo serpentinitico de la región de Moa, como material refractario.

Docente: adquisición e incremento de los nuevos conocimientos respecto al tema que se desarrolla.

Resultados esperados

Se espera de esta investigación:

1. Obtener nuevos conocimientos que contribuyan al desarrollo personal, social y científico de los investigadores;
2. Características químicas, físicas, térmicas y mineralógicas de los rechazos serpentiniticos de la región de Moa, tomando como caso de estudio los generados por la tecnología HPAL;
3. Características tecnológicas que presentan los rechazos serpentiniticos generados por la tecnología HPAL de la región de Moa;
4. Obtener materiales que puedan ser utilizados como refractarios, tal es el caso de las arenas de fundiciones y relleno para pinturas refractarias.

Estructura de la tesis

La tesis está estructurada en las siguientes partes:

Introducción: se muestran el diseño metodológico de la investigación resumidos en problema científico, objeto, campo de acción, objetivos, hipótesis y aportes de la investigación.

Capítulo 1: se fundamenta científicamente la posibilidad de utilizar el rechazo serpentinitico generado por la tecnología HPAL de producción de Ni + Co en Moa. Se comprueba que este material posee importantes propiedades que garantizan su utilización industrial.

Capítulo 2: se exponen los principales materiales y métodos de la investigación utilizados para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación.

Capítulo 3: se caracterizan tecnológicamente los rechazos serpentiniticos que garantizan su uso como material refractario.

Capítulo 4: se analizan los resultados de la investigación exponiendo científicamente las características tecnológicas de los rechazos serpentiniticos estudiados, la evaluación del uso de estos materiales como refractarios y la implementación de un procedimiento para su tratamiento y uso.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo tiene como propósito abordar los fundamentos teóricos relacionados con el tratamiento de los rechazos serpentiniticos de la Empresa Moa Nickel S.A para su posible uso como material refractario, donde se recoge toda la información relacionada con el análisis bibliográfico, la caracterización de los residuos mineros, los principales términos y conceptos empleados en la investigación desde el punto de vista técnico, el impacto ambiental y sostenibilidad de los mismos, así como, la descripción del flujo tecnológico, teniendo como base la revisión de estudios precedentes.

1.1 Términos y conceptos empleados en la investigación

La definición, análisis de los términos y conceptos clave que sustentan el estudio de los rechazos serpentiniticos y su aplicación como materiales refractarios, se ofrecen a continuación como base para una comprensión sólida de las propiedades y comportamientos que se trataran en la investigación.

Materiales refractarios: los materiales refractarios se pueden definir como materiales estructurales capaces de soportar altas temperaturas. Siendo utilizados ampliamente por la industria del acero como recubrimiento de hornos y ollas, para el manejo y transporte de metal fundido y escoria. Debido a las condiciones de servicio a que está sometido un refractario en la producción de acero o de piezas fundidas, este debe poseer características de resistencia al choque térmico, refractariedad, esfuerzos compresivos, abrasión, ataque de escoria, entre otros (Guideao Pires, 2019); (Alfran, 2024).

Según, Inoriza (2003) "Todo material cerámico o no, capaz de resistir las temperaturas elevadas y las condiciones del medio, y todo ello, durante un periodo de tiempo que resulte económicamente rentable y sin deterioro de sus propiedades tanto físicas como químicas".

Aglutinantes: los aglutinantes son sustancias de origen orgánico e inorgánico que tienen la función de unir los granos de arena entre sí en las mezclas de moldeo, (Hernández Ruiz, Rivero, & Valencia Morales, 2017).

Aditivos: son sustancias que se añaden a las mezclas de moldeo, diferentes a las arcillas, con el fin de mejorar sus propiedades y rendimiento, (Suárez Lisca, Coello Machado, & Cruz Pérez, 2022).

Arenas de moldeo: el término arena se refiere, según la Sociedad de Fundidores Americanos (A.F.S.) en (1952) a un mineral o mezcla de minerales en granos de tamaño variable de 0,02 hasta 2 mm (240 a 8 mallas) en diámetro. Por lo tanto, la arena no es solamente arena de sílice, sino que la definición sirve también a otro tipo de arenas; por ejemplo, zirconio, cromita y olivino, muy usadas por los fundidores de acero.

La mayor producción de piezas fundidas se realiza en moldes de arena. Las arenas utilizadas en fundición están constituidas esencialmente de un material principalmente granular, la arena propiamente dicha y de un aglutinante que confiere a la arena la cohesión suficiente para la ejecución del molde.

La arena, generalmente silíceo, constituye más del 85 % de los moldes compactados por medios físicos y alrededor del 98 % de los moldes y machos químicos. La consecución, por tanto, de un buen molde o macho requiere en gran medida del empleo de una arena correcta. Además de la arena de silicio se utilizan otras arenas para la confección de moldes y machos, destacan la arena de olivino, la arena de zirconio y la arena de cromita, las características de las mismas se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las principales arenas empleadas en la fundición de piezas

Características	Tipos de arenas			
	Sílice	Olivino	Circonio	Cromita
Composición	SiO ₂	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	ZrSiO ₄	FeO.Cr ₂ O ₃
Coste	Bajo	Medio	Alto	Alto
Dilatación a 900 °C	1,5 %	0,9 %	0,4 %	0,7 %
Difusividad térmica	Baja	Baja	Elevada	Elevada
Punto de fusión °C	1700	1700	2500	2100
Densidad (kg/litro)	2,65	3,25	4,6	4,4
Densidad aparente	1,5 – 1,6	1,9 – 2,0	2,7 – 2,9	2,5 – 2,7
Mojabilidad	Posible	Posible	Difícil	No moja
PH alta temperatura	Ácido	Básico	Algo ácido	Básico

Fuente: (Auxiliar Industrial S.A, 2002).

Pinturas refractarias: son recubrimientos utilizados para proteger moldes y machos en procesos de fundición. Estas pinturas deben asegurar una alta resistencia a la penetración metálica y proporcionar un buen acabado superficial a las piezas fundidas. Su aplicación es

crucial en la interfaz entre el molde y el metal, donde pueden influir significativamente en la calidad del producto final, (Forehand, 2021).

Mezclas de moldeo: es la unión de diferentes materiales capaces de producir un material de construcción con el cual se pueda elaborar el molde, o sea, la cavidad en la que se vierte la aleación para obtener la pieza fundida, (Hernández Ruiz, Rivero, & Valencia Morales, 2017).

Los ingredientes básicos de las mezclas son: las arenas de moldeo, el aglutinante y un agente activante de la aglutinación, que en la mayoría de los casos es el agua.

Las mezclas deben reunir una serie de propiedades, entre las cuales, las principales propiedades físicas son: la penetrabilidad a los gases, la resistencia a la tracción y la compresión, la plasticidad, refractariedad, entre otros, que desempeñan un papel primordial para la obtención de piezas de buena calidad. La granulometría, dimensiones y forma de los granos de las arenas también influyen en el buen acabado de las piezas fundidas, (Grey Medina, 2010).

Características tecnológicas: va más allá de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas de estos rechazos serpentínicos, es decir, se refiere a una evaluación exhaustiva de estos componentes en la viabilidad como materiales refractarios; lo que supone el análisis de la temperatura de fusión, temperatura de reblandecimiento.

Las propiedades o características tecnológicas son las que permiten a los materiales recibir las formas requeridas para su empleo, desde su elaboración hasta su posicionamiento definitivo en obra. En este procesamiento de los materiales entran en juego las propiedades de separación, agregación y transformación, asociadas a las respectivas operaciones.

1.2 Antecedentes y actualidad del tema

Se entiende como rechazos serpentínicos a las partículas superiores a 20 Mesh, el cual de forma general es un material estéril, producto del proceso de la planta de preparación de pulpa de la tecnología HPAL de Moa, las cuales presentan contenidos de Fe, Ni, Co, Mg, Si, Al y otros elementos, que les confiere a estos, la posibilidad de ser reutilizados, es por ello que constituyen antecedentes de la investigación el uso de los rechazos serpentínicos como material de la construcción, de tal manera que sean referentes de la investigación los trabajos realizados con las dunitas serpentinizadas para su uso como material refractario.

1.2.1 Antecedentes en el uso de los rechazos serpentiniticos

Los principales usos de los rechazos serpentiniticos han sido como material de la construcción, es por ello que, Montero Gil (2020) plantea la determinación de las características físicas - químicas del pasivo ambiental “rechazo serpentinitico” del yacimiento Moa Occidental, de la Empresa Moa Nickel SA, para la contribución en la toma de decisiones sobre sus posibles alternativas de usos y al logro de un desarrollo sostenible. Lo que se encuentra estrechamente vinculado con el objeto de estudio de la investigación donde se analizan las características tecnológicas del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL en producción de Ni + Co.

La serpentina constituye el mayor por ciento del rechazo de planta de pulpa en Moa Nickel; estos residuales industriales han sido probados por otros investigadores, que han llegado a elaborar diversos materiales de construcción como se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Materiales de construcción elaborados con rechazo serpentinitico de la Empresa Pedro Soto Alba de Moa. **Fuente:** Terrero Aguirre, (2011).

En el año (1985) Rodríguez Pacheco, demuestra el uso del material serpentinitico en la construcción de presas locales; con la utilización del material serpentinitico como base de las obras hidráulicas y para su empleo como material de la construcción, en el que indagó en la clasificación de las rocas, su composición química y mineralógica, así como los resultados de las investigaciones geológicas realizadas para el diseño de presas locales en los cuales se han empleado materiales serpentiniticos.

Otros trabajos realizados en cuanto al uso de estos materiales se deben a la minería en la construcción de escolleras y en el mejoramiento de los caminos mineros y respecto a los estudios realizados, Casals Corella (1986), referido a las serpentinas en la construcción de obras hidráulicas y en el año 2006 (López Peña), sobre la caracterización geológica de las materias primas minerales de los municipios de Moa – Sagua de Tánamo para su empleo como materiales de construcción en el cual se estudia y analiza la composición

granulométrica del material grueso mayor de 20 mm para su posible utilización como árido en la construcción y donde el 21,92 % de las muestras está constituido totalmente por material grueso (fragmentos de serpentinas).

El informe titulado "Caracterización del mineral de rechazo por el proceso de planta de preparación de pulpa" de Lavaut Copa (2001) destaca que la planta genera un rechazo significativo de serpentinas, que asciende a más de 200 000 m³ anuales. Este rechazo presenta un nivel de contaminación por material laterítico superior al de la empresa Ernesto Che Guevara.

Es por ello que, Montero Gil (2007), desarrolló estudios físico – químicos a estos rechazos contabilizando los volúmenes de este material por año; determinando que el rechazo de planta de pulpa menor de 100 mm es idóneo para utilizarlos en hormigones de hasta 20 MPa que resultan ser los más utilizados en obras sociales, siendo inocuos con los álcalis del cemento y presentar buen comportamiento ante las condiciones del intemperismo.

Mientras que, en ese mismo año, (Céspedes Rivera) realizó una evaluación similar al rechazo serpentinitico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara con el objetivo de utilizarlo como áridos para obras sociales en hormigones hasta 30 MPa con la realización de ensayos destinados a conocer las propiedades físicas- mecánicas y químicas que tendría un árido de este material, teniendo en cuenta los principales aspectos que imposibilitarían su uso.

En ese mismo aspecto, Pérez Stest (2009), realiza una investigación para establecer las dosificaciones requeridas para obtener hormigones hidráulicos de medias prestaciones a partir de los áridos serpentiniticos del rechazo de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, en la que se obtienen hormigones de resistencia de hasta 20 MPa. Estos hormigones pueden ser empleados, según la NC en: cimientos aislados, corridos y en prefabricados; pedestales in situ y prefabricados; muros de contención forzados y vigas de cerramientos.

Por su parte, López Peña (2006) caracteriza geológicamente las materias primas de los municipios de Moa - Sagua de Tánamo y su empleo como áridos para la construcción, donde conformó morteros del material rechazado de la planta de pulpa de empresa Moa Nickel S.A y material de rechazo de la Empresa Ernesto Che Guevara, obteniendo resultados satisfactorios para estudios posteriores.

Como señala Céspedes Rivera (2010), los desechos sólidos de la planta de pulpa de la empresa Pedro Sotto Alba pueden ser empleados como áridos para la construcción, ejemplo:

fabricación de bloques huecos de hormigón y el de Kattel (2017), que explica que el empleo de estos desechos serpentiniticos de la Empresa Pedro Soto Alba Moa Nickel SA, es factible en la fabricación de bloques huecos y morteros para la construcción.

Así también Anidos (2007), demuestra que los ensayos realizados a los desechos serpentiniticos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara han mostrado resultados positivos para su uso en la construcción, específicamente como mortero para muros portantes, así como en el acabado interior y exterior de edificaciones, y en la construcción de pasillos y pavimentos de manera alternativa. Además, señala que la Empresa Ernesto Che Guevara generó un promedio de 7 412,56 toneladas al mes de desechos serpentiniticos en 2007, cifra que debe considerarse como un impacto ambiental significativo.

Aunque Wilson (2008), presenta su trabajo de diploma, "Caracterización de las serpentinas del municipio de Holguín como áridos para la construcción", en el que se realizó una caracterización físico – mecánica y se estudiaron dosificaciones, pero los resultados de las prestaciones obtenidas de los hormigones fueron bajas, siendo muy probable atribuir estos resultados a que las serpentinas estudiadas tenían indicadores deficientes (producto de la gran trituración natural del material y su estado avanzado de alteración).

Jiménez Barthelemis (2008), determinó la caracterización química y físico – mecánica y establecer las características típicas de trituración del material rechazado, en las trituradoras de mandíbulas para un diámetro máximo igual a 75 mm para la trituradora TQ 320 x 65 mm y 40 mm para la trituradora TQ 150 x 75 mm, cuyos objetivos demostraron que puede ser posible usar los desechos serpentiniticos de la Empresa Che Guevara como árido en la industria de los materiales de la construcción.

En cuanto a su tratamiento como material refractario, aunque no se menciona explícitamente en los estudios revisados, la caracterización físico - química de estos rechazos podría abrir oportunidades para explorar su uso en aplicaciones que requieran resistencia a altas temperaturas, aspecto que se analiza en el acápite de la Caracterización de los rechazos serpentiniticos.

1.2.2 Referentes teóricos de la investigación

La industria de refractarios se desarrolla en el sentido de la elevación incesante de la calidad y resistencia de estos y gracias a ello, el consumo específico de materiales refractarios se reduce correspondientemente, (Strelov, 1975).

Es por ello que Pons Herrera y Leyva Rodríguez (1996), evalúan las arcillas ferro – caoliníticas – gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición por sus buenas propiedades refractarias, donde realiza ensayos mecánicos a las mezclas preparadas que permiten su utilización como material principal en la preparación de masas y cementos refractarios y asegura no solo la calidad y durabilidad del material sino también un significativo ahorro de recursos, debido a las facilidades de extracción, preparación y transportación de las mismas.

A partir de las arenas de fundición y componentes refractarios obtenidos durante el procesamiento mecánico de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, (Pons Herrera J. A., 2000), desarrolla formulaciones para la preparación de mezclas de moldeo y pinturas contra las costras de penetración durante el proceso de fundición de piezas.

Mientras que, Pons et al., (2000) exponen los principales resultados de la caracterización físico – química y mineralógica de las dunitas serpentinizadas de las zonas de Amores y Miraflores en la región de Moa-Baracoa, donde demuestran la presencia de minerales del grupo de la serpentina, principalmente antigorita, debido al proceso de serpentización que ha afectado a estas rocas, y su transformación en fase forsterita luego de su calentamiento de vital importancia para su empleo como material refractario.

En Cuba y específicamente en las regiones de Camagüey, Holguín, Pinares de Mayarí, Sagua de Tánamo y Moa-Baracoa existen abundantes reservas de rocas duníticas, portadoras de mineral de olivino, con importantes propiedades refractarias que garantizan su utilización como arena de fundición y en la preparación de pinturas contra la penetración metálica. Sin embargo, no existen antecedentes del uso oficial de estos materiales en los talleres de fundición y demás empresas del país, Pons et al., (2005).

Estos autores, refieren las perspectivas de producción de materiales refractarios con el uso de las ultrabasitas de los sectores Merceditas y Amores que comprenden las litologías de las dunitas serpentinizadas, las harzburgitas serpentinizadas y en pequeñas proporciones las serpentinitas, además de las ultrabasitas de Pinares de Mayarí y Camagüey, evaluando también en los yacimientos de cromita y magnesita, localizados en la provincia de Holguín y Camagüey. Sobresalen en este sentido, los yacimientos de cromitas de, Merceditas, Amores, Camagüey-II, Victoria-I, entre otros, sin embargo, no analizan las particularidades en cuanto a la utilización de los rechazos serpentiniticos, como material refractario en la fundición.

Así también, Ferreiro et al., (2007) estudian el comportamiento a elevadas temperaturas para determinar la refractariedad, de una muestra de concentrado de cromita, a partir de conos sometidos a temperaturas de 1600 °C, de este modo demostraron que los mismos resistieron esta temperatura sin que sufrieran deformaciones.

De este modo, Pons et al., (2019) estudiaron el comportamiento térmico y las transformaciones de fases de las dunitas serpentinizadas de la región Moa - Baracoa sometidas a temperaturas entre 1 200 °C y 1 600 °C, como consecuencia del calentamiento de las dunitas a estas temperaturas produjo una estabilización de las fases forsterita y periclasa, lo cual confiere este material importantes propiedades refractarias, que fundamentan el uso de esta materia prima en los procesos metalúrgicos de fundición.

Los primeros análisis térmicos realizados en dunitas serpentinizadas de los yacimientos de cromitas de las zonas de Merceditas, Amores y Miraflores, de la región de Moa – Baracoa, Pons, Leyva, Fiol (1998); Pons (1999), (2000) se desarrollaron como promedio a 1 600 °C, temperatura a que sería sometida esta materia prima en los procesos de fundición. Posteriormente mediante la técnica de difracción de rayos X, se determinaron las principales transformaciones de fase que experimenta este material durante su utilización como material refractario, principalmente, como arena de moldeo y relleno para pinturas.

Mientras que Guideao Pires (2019), plantea la caracterización químico – granulométricamente los desechos de dunitas generados en la explotación de cromo en el yacimiento de Cayo Guan para su uso como materia prima refractaria para pintura, en el que pudo concluir que las dunitas de Cayo Guan poseen una composición química adecuada para obtener refractarios de forsterita, pero no pueden ser usadas como pintura sin un tratamiento térmico previo porque permite la penetración del metal en el molde.

1.3 Caracterización de los rechazos serpentínicos

Los rechazos serpentínicos de la región de Moa - Baracoa, a pesar del conocimiento de sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y térmicas, no han sido evaluados para su uso como material refractario, por tanto, es importante además de revisar los estudios previos que analicen estos aspectos, establecer la relación entre estas propiedades, su potencial y uso en aplicaciones refractarias.

En el estudio preliminar de las bibliografías existen diferentes investigaciones que abordan el tema sobre el uso de los desechos serpentínicos y sus posibles alternativas que son de gran

utilidad para la sociedad; como podrían ser su utilización a escala industrial en la construcción de obras de diversas índoles tales como las arenas de fundiciones, los fundentes, las pinturas refractarias, arenas, granos, morteros, bloques, mezclas asfálticas y otros.

A través de un análisis detallado de las características químicas se evidencia que el contenido de óxido de silicio varía de 29, 16 a 39, 00 % siendo este el componente de mayor contenido presente en los rechazos serpentínicos de la tecnología HPAL como se muestra en la Tabla 2, con respecto al óxido de magnesio el cual es el elemento mayoritario, no se observa una variación considerable entre los yacimientos comparados, puesto que en el trabajo realizado por Ganesh Persaud (2014) el elemento presenta un contenido de 36, 6 % en el rechazo analizado de los yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara, con los que se han hecho ensayos en la construcción de morteros y hormigones, mientras que en los yacimientos Moa Occidental y Moa Oriental, los contenidos de este elemento en el rechazo varían muy poco, teniendo mayor contenido con un 33, 00 %, el yacimiento Moa Oriental.

Tabla 2. Composición química de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL

Muestras de rechazos serpentiniticos	Composición química, %											Autores	
	NiO	CoO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ²⁺	Fe ³⁺	SiO ₂ /MgO	MgO/SiO ₂		
Yacimiento Moa Occidental	0,40	0,02	-	21,75	0,25	38,08	0,58	-	8,05	1,75	0,57	(Montero Gil, 2007)	
Yacimiento de la empresa Ernesto Che Guevara	0,32	0,03	-	36,6	0,53	39,4	0,9	-	8,9	1,07	0,92	(Ganesh Persaud, 2014)	
Yacimiento Moa Oriental	0,574	0,02	-	33,201	0,621	29,16	0,86	-	5,36	0,87	1,13	(Herrera Casas, 2018)	
Yacimientos de la tecnología HPAL	0,574	0,020	0,164	33,201	0,621	29,160	0,860	2,020	3,340	0,88	1,14	(Ferrer Batista, 2023)	

Elaborado por: Ferrer Batista, Adianes

El hierro, como tercer elemento de mayor contenido en el rechazo serpentinitico de Moa Oriental, está presente de forma minoritaria con un 5,36 % con respecto a los Yacimientos de la Empresa Ernesto Che Guevara y al Yacimiento Moa Occidental de la Empresa Pedro Soto Alba los cuales presentan contenidos con poca variación. Otros elementos presentes en este rechazo, pero con contenidos bastante discretos y con pocas variaciones entre ellos son el níquel, el cobalto, el aluminio y el cromo.

De este modo, los rechazos serpentiniticos tanto de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A como de la Empresa Ernesto Che Guevara, tienen una composición química bastante similar, lo que posibilita su utilización como material de la construcción, no obstante, (Ferrer Batista, 2023) plantea que los rechazos de la tecnología HPAL pueden ser utilizados como material refractario, debido a su incidencia en los contenidos de silicio

y magnesio, característicos de estos minerales con fases mineralógicas principales de lizardita, crisotilo y olivino en la que incide la forsterita, elemento que les confiere propiedades refractarias.

Las fases mineralógicas presentes en los rechazos serpentiniticos de los Yacimientos de Moa Occidental y Oriental de la Empresa Pedro Soto Alba- Moa Nickel S.A que se ilustran en la Tabla 3, tienen un predominio en cuanto a los minerales de serpentina, los cuales representan de un 73 a un 75 % de contenido de fase en el rechazo con un predominio en el Yacimiento de Moa Oriental, mientras que en los minerales arcillosos no existe variación entre un yacimiento y otro, entre los contenidos de fases, puesto a que estos oscilan entre 19, 57 y 19, 63 %, respectivamente, observándose una diferencia muy discreta de 0, 6 % de contenido de fase.

Tabla 3. Composición mineralógica de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL

Fases mineralógicas	Contenido de las fases mineralógicas		
	Yacimiento Moa Occidental (Montero Gil, 2007)	Yacimiento Moa Oriental (Herrera Casas, 2018)	Yacimientos de la tecnología HPAL (Ferrer Batista, 2023)
Gibbsita, %	11,11	33,44	33,44
Minerales de serpentina, %	73,94	75	-
Minerales arcillosos, %	19,57	19,63	19,50
Goethita, %	7,80	3	-
Espinelas de cobalto y manganeso	-	-	20,4

Elaborado por: Elaboración propia

Por otra parte, la diferencia entre estos yacimientos se observa en cuanto al contenido de gibbsita, la cual varía de un yacimiento a otro con una diferencia de contenido de 22,33 %, la cual es bastante significativa. Mientras el contenido de minerales de hierro presentes en la fase goethita en ambos yacimientos varía de 3 a 7, 8 % con predominio en el Yacimiento Moa Occidental.

El comportamiento térmico de los rechazos serpentiniticos no presentan gran variación a pesar de ser minerales de distintos yacimientos, ver Tabla 4.

Tabla 4. Composición térmica de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL

Yacimiento/Fuente	Curva	Temperatura	Pérdida de masa
Yacimiento Yagrumaje perteneciente a la empresa Ernesto Che Guevara (Ganesh Persaud, 2014)	ATD/TG	100 – 200 °C (Endotérmico)	Eliminación del agua higroscópica y presencia de goethita
		570 – 760 °C (Endotérmico)	Eliminación del agua interna (mayor pérdida de masa del material)
		760 – 850 °C (Exotérmico)	Ocurre la menor pérdida de masa y la transformación de la fase antigorita en forsterita, que origina un reordenamiento estructural del olivino.
Basamento de los yacimientos de Moa Oriental de la Empresa Pedro Sotto Alba (Ganesh Persaud, 2014)	ATD/TG	100 – 300 °C (endotérmico)	Eliminación del agua higroscópica y presencia de goethita
		630 °C (endotérmico)	Eliminación del agua estructural
		780 °C (exotérmico)	Reestructuración del olivino con la formación de forsterita
Moa Oriental (Herrera Casas, 2018)	ATD/TG/DTG	50 – 240 °C (endotérmico)	Eliminación de la humedad y la presencia de goethita, con un máximo a los 95 °C
		510 – 840 °C (endotérmico)	Eliminación del agua estructural de los minerales de serpentina (lizardita y crisotilo), con un máximo a 637 y 690 °C
		650 – 840 °C (exotérmico)	Reestructuración de los minerales de serpentina presentes con un máximo en 813 °C
Yacimientos de la tecnología HPAL (Ferrer Batista, 2023)	TG/DTG	Hasta los 260 °C	Existe una pérdida de masa de 4% asociado a la eliminación del agua higroscópica

390 – 825 °C

Pérdida de masa de un 12% asociado que corresponde a la eliminación del agua estructural y a la recristalización y reestructuración de los minerales de olivino presentes en estas materias primas.

Los picos endotérmicos oscilan entre los 50 y 300 °C para los minerales de serpentina de los tres yacimientos, y todos están relacionados con la pérdida de humedad higroscópica a temperaturas similares, mostrando también la presencia de minerales de hierro en la fase mineralógica de goethita. Para el segundo efecto endotérmico se observa como este oscila entre los 510 y 840 °C para los tres termogramas analizados están relacionados con la pérdida del agua estructural de los minerales de serpentina, con predominio de la lizardita y el crisotilo presentes en este rechazo.

Como última fase resultante de los termogramas ocurre un efecto exotérmico, el cual oscila entre los 510 y 850 °C, común en los resultados obtenidos al analizarse los termogramas de los yacimientos en comparación; este efecto exotérmico está relacionado con la reestructuración de los minerales de serpentina presentes en el rechazo analizado común para los tres yacimientos en cuestión.

En este sentido, hasta los 260 °C existe una pérdida de masa de 4% asociado a la eliminación del agua higroscópica y en el intervalo de los 390 a 825 °C una pérdida de un 12 % aproximadamente lo que corresponde a la eliminación del agua estructural y a la recristalización y reestructuración de los minerales de olivino y serpentina presentes en estas materias primas. En la curva de TG no se pueden apreciar definitivamente estos dos procesos continuos, dada la velocidad de calentamiento a la que se efectúa el proceso, tal como expresara Ferrer Batista (2023).

Estos resultados demuestran que estamos en presencia de un mineral serpentinitico, que posee entre sus componentes minerales de olivino, con predominio de la fase mineralógica forsterita ($MgO \cdot SiO_2$) la cual posee elevada refractariedad y resistencia mecánica, lo que facilita la toma de decisiones sobre su posible uso como refractario.

Los rechazos serpentiniticos, aunque han sido utilizado en disimiles ocasiones como material de construcción, poseen gran estabilidad química lo que propicia su funcionalidad a elevada

temperatura. De este modo, los materiales refractarios basados en serpentina pueden soportar temperaturas extremadamente altas sin descomponerse, según expresara Hrsak, Sucik, Lazic (2008), lo que los convierte en opciones ideales para aplicaciones que involucran calores intensos.

Los resultados de la caracterización físico, química, mineralógica y térmica confirman la posibilidad de usar el rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL de producción de Ni en Moa, como material refractario y de construcción, fundamentado en la presencia mayoritaria de minerales de olivino, donde predomina la fase forsterita, de elevada refractariedad, que combinada con sus bondades de resistencia mecánica, propician su reutilización industrial, como parte de la economía circular que se aplica a estos residuales de la industria cubana del níquel, (Феррер Батиста, Понс Эррера, Ю.В, & Рамирес Перес, 2024).

En el alcance de esta investigación, se pretende demostrar porque es posible usar estos rechazos serpentiniticos como material de construcción, sin embargo, para esta tesis, estaremos concentrados en su uso como material refractario.

1.4 Impacto ambiental y sostenibilidad de los rechazos serpentiniticos

El impacto ambiental de los rechazos generados por la minería del Níquel es significativo, destacando la importancia de su reutilización para minimizar el impacto ambiental que actualmente producen.

La actividad minera, como la mayor parte de las actividades que el hombre realiza para su subsistencia, crea alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan impactos sobre el medio en que se desarrollan. Estas cuestiones, que hace algunos años no se percibían como un factor de riesgo para el futuro de la humanidad, hoy se contemplan con gran preocupación, que no siempre está justificada, (Oyarzun, 2011).

La utilización de los rechazos serpentiniticos generados por la tecnología HPAL de Moa como material refractario representa una aplicación efectiva de los principios de economía circular ya que fomenta un ciclo continuo de reutilización, alineándose con las metas globales de desarrollo sostenible y minimización del impacto ambiental. Al transformar residuos industriales en recursos útiles, lo que evita la acumulación de desechos que podrían causar contaminación y deterioro ambiental. Este enfoque no solo contribuye a un desarrollo sostenible, sino que también ayuda a gestionar los Pasivos Ambientales Mineros

Metalúrgicos sólidos (PAMMs) generados por la industria, transformando un desafío ambiental en una oportunidad constructiva.

De este modo, por pasivo ambiental se entiende la suma de los daños no compensados producidos por una empresa al medio ambiente a lo largo de su historia, en su actividad normal o en caso de accidente, (Russi & Martínez Alier, 2003). En lo que respecta a la definición de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) adoptaremos la siguiente: “pasivo ambiental minero hace referencia a los impactos ambientales generados por las operaciones mineras abandonadas con o sin dueño u operador identificables y en donde no se hayan realizado un cierre de minas reglamentado y certificado por la autoridad correspondiente, (Doroni, 2020).

Aunque se conoce por todos lo que implica la generación de pasivos ambientales y su no tratamiento, es un tema poco abordado, aunque en los últimos años ha logrado una rápida difusión. Países de América Latina como Bolivia, México, Perú y Chile han realizado investigaciones y esfuerzos para lograr avances en la definición y manejo de los pasivos ambientales, abordando varias definiciones sobre la conceptualización, (Álvarez Ortiz, 2020).

En Cuba, existen varios criterios sobre su dominación producto de investigaciones realizadas a lo largo de más de 50 años, pero no existe una definición específica para los pasivos ambientales mineros metalúrgicos ya que las leyes existentes no la definen claramente, por lo que “el análisis de los PAM es casi nulo entre las autoridades, especialistas y dirigentes empresariales, (Ponce Seoane & Díaz Comesañas, 2011).

En su trabajo *Remediación de pasivos ambientales mineros como estrategia para el cuidado del ambiente*, (Sotomayor Cabrera, 2016) se auxilia en los efectos que tienen en el medio ambiente los pasivos ambientales, por lo que refiere:

De acuerdo con la Ley 28271 y el D.S. 059-2005-EM, los pasivos ambientales mineros se consideran a aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, que hayan sido abandonadas o permanezcan inactivas y constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, seguridad, el ecosistema y la propiedad; desde su generación y permanencia en el tiempo, no ha sido incluido en ningún estudio ambiental como es el caso del programa de adecuación y manejo ambiental, que en la actualidad es obligatorio considerar en el estudio de impacto ambiental, declaración de impacto ambiental y cierre de minas, entre otros.

Lo que nos permite así con esta investigación abordar sobre una nueva economía basada en la sostenibilidad, cuyo objetivo es que el valor de los materiales, los recursos y los productos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible y que se reduzca al mínimo la generación de residuos.



Figura 2. Posibilidad de funcionamiento de la economía circular con el uso de los rechazos serpentiniticos. **Fuente:** (Falappa, Lamy, & Vazquez, 2019).

Con el esquema expuesto en la Figura 2 se tiene en cuenta los rechazos generados durante el proceso de extracción y procesamiento de níquel, mediante la tecnología HPAL considerados como materia prima alternativa.

De manera tal que para demostrar la posibilidad de funcionamiento de la economía circular con el uso de los rechazos serpentiniticos es necesario someter a estos a proceso de preparación mecánica con la trituración y molienda para reducir su tamaño y mejorar sus propiedades físicas y así su utilización como material refractario, logrando así suministrar a los talleres de fundición productos como arenas y pinturas elaboradas.

Estos rechazos serpentiniticos son resultado del proceso que se lleva a cabo en la nueva planta de preparación pulpa de la Empresa Moa Nickel S.A que presenta las características que se describen en el epígrafe que se ofrece a continuación, los cuales no tienen posterior utilización industrial hasta la actualidad.

1.5 Características de la nueva planta de pulpa de la Empresa Moa Nickel S.A

Como parte de la expansión productiva de la Empresa Moa Nickel S.A, se construyó y comenzaron a principio de 2024, una nueva planta de pulpa, la cual, a diferencia de la inicialmente construida en 1958, garantiza una mejor clasificación y separación de los rechazos serpentínicos en fracciones mayores de 0, 84 mm. Así, para el desarrollo de esta investigación, se seleccionaron las fracciones mayores de 100 mm, que son rechazadas y no utilizadas por la empresa. En la Figura 3 se ilustran las muestras obtenidas y procesadas en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), para su posterior utilización en el taller de fundición de la EMNi en Moa.



Figura 3. Instalaciones de la nueva planta de pulpa y muestras de investigación seleccionadas

De manera resumida, esta planta funciona de la manera siguiente: el mineral de la mina se transporta a la nueva Planta de Pulpa en camiones. El proceso de la Planta comienza con la deposición del material en la criba de descarga 115-SN-01. Este punto cuenta con un martillo rompe rocas 115-RH-01, encargado para demoler las rocas que no pasan por la criba de descarga. Aquí se cuenta con el primer rechazo de rocas para las partículas mayores de 600 mm (Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A Subdirección de producción, 2018).

Para controlar la descarga de mineral de los camiones en la tolva de descarga 115-BN-01 existen mediciones de nivel para controlar las luces de tráfico (igual que semáforos) indicándole a los conductores de camiones si pueden o no descargar el mineral. Cuando el nivel del mineral en la tolva de descarga no es muy alto, el sistema de control de la planta activa la luz verde y los camiones pueden entonces descargar el mineral. Cuando el nivel de mineral es alto, el sistema activa la luz roja y los camioneros paran la descarga hasta que la

luz roja se apague y se encienda la verde. Estas luces de semáforos se pueden controlar manualmente desde las estaciones de operación en la sala de control central de la nueva Planta de Pulpa.

La tolva de descarga 115-BN-01 nutre al alimentador de placas (esteras) 115-FD-01, el cual es accionado por un motor eléctrico con variador de velocidad para regular el mineral que se alimenta al triturador primario 115-CR-01. Este alimentador de esteras cuenta con los instrumentos estándares requeridos para proteger a las personas y equipos contra el mal funcionamiento o errores de operación.

El alimentador de placas (esteras) descarga el mineral en el triturador primario 115-CR-01 para reducir el tamaño de las rocas presentes en el mineral alimentado a 200 mm como tamaño máximo. El material que pasa por el triturador primario se deposita en la banda de alimentación del transportador 115-CO-01 el que cuenta con la pesa 115-WT-01 para controlar el flujo de mineral alimentado, del transportador 115-CO-01 el mineral se alimenta al transportador 115-CO02 que es el encargado de formar las pilas de mineral triturado para el llenado posterior de los camiones con un cargador frontal o una retroexcavadora, estos camiones transportan el mineral triturado hacia la planta de Pulpa vieja.

En esta área de la planta existe un sumidero (115-SU-01) encargado de recolectar todas las aguas residuales y mediante la bomba de recolección de residuales 115-PU-15 enviarlas a la piscina de sedimentación.

1.6 Conclusiones del capítulo 1

A partir de las fuentes bibliográficas analizadas, se presentan insuficiencias que constituyen líneas de trabajo de la investigación en curso, por lo que se determinaron como conclusiones parciales las que se ofrecen a continuación:

1. A pesar de haberse utilizado con anterioridad los rechazos serpentiniticos, generados por la tecnología HPAL en Moa, principalmente, como material de construcción, son insuficientes los conocimientos científicos, que fundamentarían su uso como material refractario.
2. El uso de los rechazos serpentiniticos no ha sido estudiado como materiales refractarios, al utilizarse como materiales de construcción alternativos, principalmente, en la fabricación de morteros para la construcción, bloques de hormigón, pavimentos, entre otros, y solo se han basado estos usos en sus características físico-químicas y mineralógicas, sin profundizar en sus propiedades tecnológicas.
3. El desconocimiento de las características tecnológicas de los rechazos serpentiniticos conlleva a que no sea posible una determinación general de sus posibles usos industriales, no obstante, constituyen un buen referente los trabajos realizados con las dunitas serpentinizadas para su uso como material refractario, teniendo en cuenta sus similares características y presencia de olivino en su composición química y mineralógica.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen las características de los yacimientos minerales que participan en la alimentación de la nueva Planta de Preparación de Pulpa de la Moa Nickel S.A. y su ubicación geográfica, la selección de las muestras, así como los materiales y métodos, utilizados para el cumplimiento de los objetivos de la investigación.

2.1 Localización de los rechazos serpentiniticos

Los yacimientos de lateritas ferro - niquelíferas de Cuba están ubicados fundamentalmente en la parte norte de la Isla. Las mayores reservas se localizan en la región nororiental, en la provincia de Holguín; que es la zona de estudio, la cual se localiza en el municipio de Moa, tal como se muestra en la figura 4.

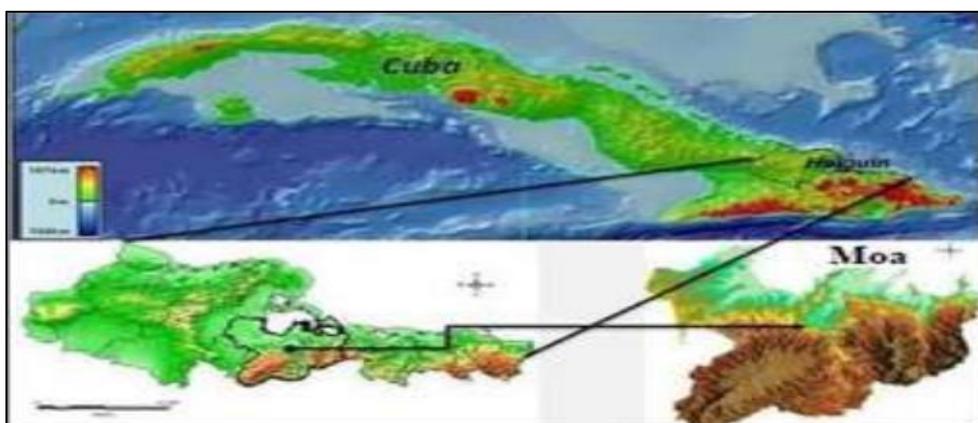


Figura 4. Localización de la zona de estudio. **Fuente:** (Pons Herrera, Pérez, María, & Ortiz Bárcenas, 2021).

Los rechazos serpentiniticos a evaluar se encuentran en la planta procesadora de Ni + Co, HPAL ubicada en las cercanías del reparto Rolo Monterey y Veguitas.

Los yacimientos que participan en la alimentación de menas a la nueva planta de preparación de pulpa de Moa Nickel S.A. se formaron a través de la meteorización de harzburgitas y dunitas serpentinizadas las cuales representan más del 95% de la roca madre. En el proceso de formación intervinieron agentes atmosféricos, hídrico, biogénicos, el relieve, génesis tectónica, transformando las rocas madres en corteza de intemperismo con textura, estructura, composición química y mineral propia. Estos yacimientos se clasifican como yacimientos ferro niquelíferos de meteorización, (Montero Gil, 2007).

El factor geomorfológico juega un papel importante en los procesos de formación de las cortezas de intemperismo, conociéndose que es necesario un relieve lo suficientemente

elevado como para permitir una adecuada transferencia de las aguas y al mismo tiempo lo suficientemente aplanado para permitir la conservación de los productos del intemperismo, (Formel, 1982).

Las litologías a partir de las cuales se formaron las potentes cortezas de intemperismo que hoy aparecen, están constituidas, fundamentalmente, por harzburgitas serpentinizadas y subordinadamente gabros y dunita según Gámez Matos (2011), las primeras aparecen prácticamente en toda el área de estudio y microscópicamente se caracteriza por ser rocas densas y masivas de granos finos a medios, encontrándose por lo general agrietadas en diferentes grados. El color de la roca fresca es de gris verdoso a gris oscuro, en ocasiones hasta negro, la masa volumétrica de esta oscila entre 2,40 y 2,60 g/cm³, en su composición mineral se encuentran los del grupo de la serpentinita (Crisotilo, Lizardita, Antigorita, entre otros), cuyo contenido anteriormente alcanza el 60 %.

2.2 Selección y preparación de las muestras

Las muestras a estudiar fueron extraídas de la descarga de la criba de +100 mm en la nueva planta de preparación de pulpa de la Empresa Moa Nickel S.A, como se puede apreciar en la Figura 5. Para llegar a la zona de depósito, se alimenta a la planta un mineral que contiene aproximadamente diez elementos en su composición, entre los cuales se encuentran níquel (Ni), cobalto (Co), silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cromo (Cr) y otros.



Figura 5. Rechazo serpentinitico de la nueva planta de pulpa de Moa Nickel S.A

La masa inicial de los rechazos serpentiniticos que se emplearon en la investigación fue de 20 toneladas, las cuales fueron trasladadas hasta el CEDINIQ para su posterior tratamiento.

En la Figura 6 se muestra el esquema para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos de la nueva planta de pulpa de Moa Nickel S.A utilizado para el procesamiento premetalúrgico de las muestras experimentales, que incluye la toma de muestra para la investigación y la caracterización física, química, mineralógica y térmica.

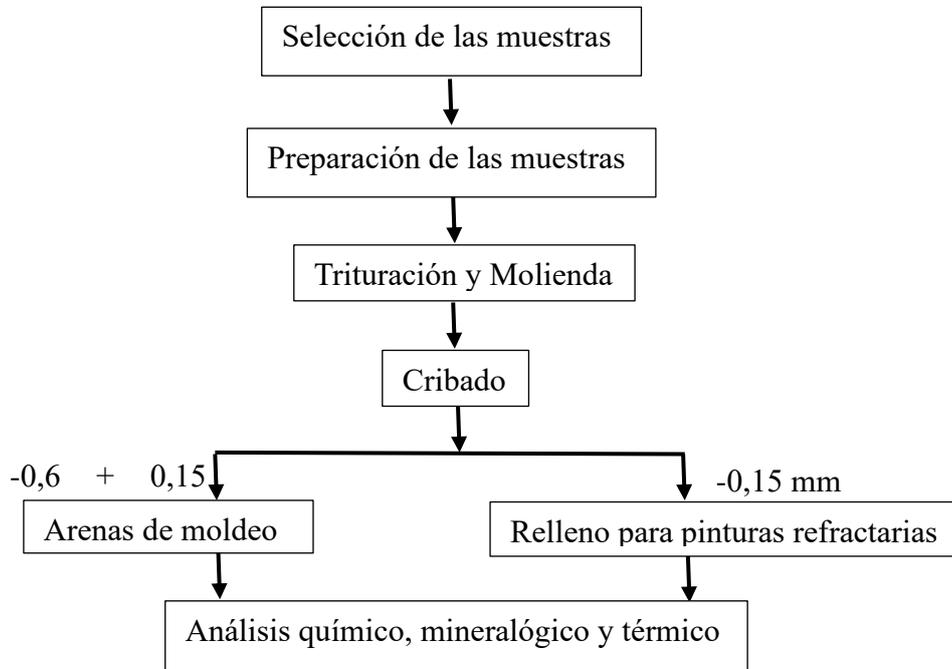


Figura 6. Esquema para el procesamiento de los rechazos serpentiniticos de la Empresa Moa Nickel S. A.

La selección de las muestras en el contexto de grandes volúmenes, como toneladas de mineral, es un proceso crítico en la investigación y análisis, es por ello que la realización del muestreo en la nueva planta de preparación de pulpa de la Empresa Moa Nickel S.A se desarrolló de manera estratificada, donde se divide el material en secciones homogéneas a la descarga de la criba con granulometrías + 100 mm y se toman muestras de cada una de ellas.

Posteriormente se realizó en el CEDINIQ la preparación mecánica de las muestras mediante los procesos de trituración, molienda y el cribado hasta obtener la granulometría requerida (-0,6 + 0,15 mm) para arenas de moldeo y -0,15 mm como relleno para las pinturas refractarias a emplearse en el taller de fundición de la EMNi. Tomando muestras de las granulometrías de interés para la realización de los análisis químicos, mineralógicos y térmicos.

2.3 Metodología de la investigación empleada

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación se emplearon técnicas analíticas y experimentales, las cuales se describen a continuación.

2.4 Técnicas analíticas empleadas

2.4.1 Análisis químico

La composición química de las muestras de rechazos estudiadas, fueron analizadas en un espectrómetro de absorción atómica, del Centro de Investigaciones y Desarrollo del Níquel (CEDINIQ). El equipo empleado es un modelo UNICAM SOLAR 929 (Simple Rayo de Luz), que se muestra en la figura 7.



Figura 7. Equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica empleado en los análisis químicos. **Fuente:** (CEDINIQ, 2022).

El procedimiento técnico de ensayo empleado para la determinación de los principales elementos químicos Si, Al, Mg, Ni, Co, Mn, Cr, Fe, Cu y Zn, fue el UPL - PT – A-26, mientras que para la determinación de hierro (II), se empleó el método volumétrico, según el siguiente procedimiento técnico de ensayo: UPL-PT-V-03. Por su parte, las pérdidas por ignición (PPI) se determinaron por el método gravimétrico, siguiendo el procedimiento UPL-PT-G-01, (CEDINIQ, 2022).

2.4.2 Análisis granulométricos

El procedimiento empleado para la caracterización granulométrica se efectuó por vía seca, en una tamizadora marca Filtra en el CEDINIQ utilizando, para la distribución granulométrica los tamices: 1 mm, 0, 40 mm y 0, 15 mm, como se observa en la Figura 8, de manera que la muestra se moviera continuamente sobre la superficie de los tamices.



a)

b)

Figura 8. Equipamiento empleado para el análisis granulométrico a) Tamizadora marca Filtra b) juego de tamices empleados en la investigación

2.4.3 Análisis mineralógico

El análisis mineralógico se llevó a cabo en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad Federal del Sur, en Rostov del Don utilizando un Difractómetro de rayos-X DRON – 7, como se muestra en la Figura 9. El objetivo principal de realizar estos análisis es identificar y caracterizar las fases mineralógicas presentes en los rechazos serpentiniticos generados por la tecnología HPAL, lo cual es crucial para evaluar su potencial uso como material refractario.



Figura 9. Difractómetro de Rayos X DRON – 7 empleado para los análisis mineralógicos.

Fuente: (Ferrer Batista, 2024).

Las principales características técnicas del equipo de difracción de Rayos X empleado en la investigación se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales características técnicas del difractor DRON - 7

Características	Valores
Esquema óptico de rayos X	Bragg – Brentano
Rango de ángulo de escaneo, $2\theta^\circ$	-100 + 165
Paso mínimo de escaneo, $2\theta^\circ$	0,001
Precisión de posicionamiento, 2θ y θ°	$\pm 0,005$
Velocidad de transporte, rpm	720
Velocidad de conteo, imp/s	5×10^5
Consumo de energía, kW	5,5
Potencia, V/Hz	220/50
Dimensiones totales, mm	1100x1800x1050
Peso, kilogramos	470
Área de instalación, m ²	5

La configuración básica incluye:

1. Goniómetro
2. Portamuestras con rotación
3. Tubo de rayos X 2,5BSV-27 Cu
4. Fuente de alimentación de alto voltaje DF3
5. Detector de centello NaJ(Tl) BDS-25-04
6. Muestra de control: cuarzo policristalino
7. Filtro beta para radiación de Cu
8. Vivienda protegida contra rayos X
9. Conjunto de repuestos y accesorios.
10. Programa de gestión y recopilación de datos de DataCol

2.4.4 Análisis térmico

El instrumento STA (Termogravimetría Simultánea) nos permite hacer análisis de Termogravimetría (TG) y Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), en una sola muestra en un solo análisis, a la vez que nos permite tener más información que haciéndolo por separado.

Los análisis térmicos se realizaron en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Universidad Federal del Sur, Rostov del Don, con el objetivo de determinar el comportamiento térmico del rechazo serpentínico objeto de estudio. Los termogramas se obtuvieron en un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 C como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Equipo NETZSCH, utilizado para realizar el análisis térmico. **Fuente:** (Ferrer Batista, 2024).

Los parámetros de operación de este equipo se pueden apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos técnicos del equipo de análisis térmico, STA 449 C.

Características	Valores
Régimen de calentamiento	Dinámico
Masa de muestras	10,320 mg
Masa del material de referencia	9,270 mg (Al ₂ O ₃)
Tipo de crisoles	Al ₂ O ₃ (tamaño estándar)
Material del horno	SiC (T.amb. – 1500 °C)
Gas utilizado en la cámara de calentamiento	Ar
Flujo del gas protector de la termobalanza	20,0 ml/min (Ar)
Velocidad de calentamiento	10,0 °C /min
Sensibilidad de la termobalanza	0,001 mg – 35.0 g
Sensibilidad de las curvas	-0,001 - 5000 μV/mg
Tiempo total de medición	1h:37 min
Rango de temperatura de trabajo	25-1000 °C

Fuente: (Ferrer Batista, 2024).

2.4.5 Equipos auxiliares utilizados en la investigación

A continuación, se describen los equipos auxiliares empleados para el desarrollo de la investigación.

Trituración: para este se empleó un triturador de mandíbulas tal como se puede observar en la Figura 11 para la trituración previa para reducir grandes piezas de material a tamaños de grano menores.

Estas trituradoras realizan un movimiento oscilatorio en la placa de trituración, con el objetivo de reducir el tamaño de las rocas. El mineral es introducido por la parte superior de la trituradora, que tiene una cavidad amplia que se va reduciendo a medida que el mineral entra en trituradora. El movimiento y la presión que la placa de triturar ejerce sobre los minerales al hacerlo chocar con la pared interna de la trituradora es lo que provoca que las rocas se fragmenten y se complete la trituración.



Figura 11. Trituradora de mandíbulas empleada para la trituración de los rechazos serpentínicos.

Molienda: se usó el molino de bolas que se ilustra en la Figura 12 que se encuentra en el Centro de Investigaciones del Níquel para reducir el tamaño de las partículas de estos rechazos serpentínicos para su posterior utilización como arena de moldeo y pintura refractaria.



Figura 12. Molino de bolas empleado para la molienda de los rechazos serpentínicos.

Características técnicas del molino de bolas empleado en la investigación para la preparación mecánica de los rechazos serpentínicos

1. Suministro, España

2. Construcción, acero angular.
3. Revestimiento interior blindajes de acero al manganeso.
4. Dimensiones D x L, 1850 x 560 mm (parte cilíndrica).
5. Capacidad de diseño, 3,5 t/h.
6. Carga de bolas, 2,6 t.
7. Velocidad de rotación del tambor, 35 rpm.
8. Diámetro de bolas: 20, 30, 40 y 60 mm.

Las bandas transportadoras con el objetivo de facilitar el traslado de los rechazos serpentínicos de manera eficiente y automatizada hasta la trituradora de mandíbulas, se muestra en la figura 13.



Figura 13. Bandas transportadoras para el traslado de los rechazos serpentínicos hasta la trituradora.

Para la determinación de las propiedades de resistencia a la compresión, humedad y permeabilidad en las mezclas de moldeo, se realizaron los análisis a escala de laboratorio en el laboratorio químico de la UEB de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, en la cual se emplearon los equipos siguientes:

Para la determinación de la composición granulométrica del material se realizó por vía seca. El análisis granulométrico constituye el elemento básico para una de las principales características físicas de los rechazos serpentínicos objeto de estudio, los tamices fueron seleccionados según la serie de Taylor $\sqrt{2}$, distribuidos en los siguientes juegos de tamices: 0,85; 0,6; 0,42; 0,3; 0,212; 0,15; 0,106; 0,075; 0,053 mm, como se aprecian en la figura 14.



Figura 14. Juego de tamices empleados en la investigación, según serie de Taylor.

Existen varios métodos de clasificación de las arenas de moldeo, no obstante, los de más amplia difusión hasta el momento, lo constituyen: el sistema de clasificación de la sociedad de fundidores americanos AFS y el sistema soviético, establecido inicialmente por el GOST 2138 – 58 y modificado posteriormente por el GOST 2138 – 74, el alemán DIN 4190, el inglés BSI 410 – 31, Normas cubanas NEIB 03-05-14 y la serie Fischer, (Santiesteban Ruiz, 2009).

Los ensayos se realizaron en el taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel en Moa, para su posterior utilización como arenas de moldeo en mezclas, basados en el sistema de clasificación de la sociedad de fundidores americanos (AFS) según (Salcines Meriño, 1985, pág. 67) establecida para estos tipos de materiales de moldeo.

Permeámetro: permite determinar la permeabilidad de las mezclas de moldeo o la capacidad para dejar pasar por su interior los gases que se originan durante la colada, equipo que se puede observar en la Figura 15.



Figura 15. Permeámetro para determinar la permeabilidad en las mezclas de moldeo obtenidas a partir de rechazos serpentínicos

Máquina de compresión: usada para determinar la resistencia a la compresión, propiedad fundamental que se debe evaluar en las arenas utilizadas para moldeo, ver Figura 16.



Figura 16. Máquina de compresión para evaluar la resistencia de compresión de las mezclas de moldeo.

2.5 Métodos de investigación empleados

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron diferentes métodos tanto teóricos como empíricos, los cuales se relacionan a continuación:

Métodos teóricos:

Análisis y síntesis: se utiliza durante todo el proceso investigativo, para el estudio y procesamiento de la información contenida en las fuentes bibliográficas, para caracterizar los rechazos serpentínicos de la industria y llegar a conclusiones.

Histórico-lógico: para determinar las tendencias que se manifiestan en el uso de los minerales serpentínicos como materiales refractarios en Cuba y el mundo.

Inducción-deducción: para determinar las causas que provocan el problema científico y su posible solución.

Hipotético – deductivo: para enfocar el problema científico, la verificación de la hipótesis y el establecimiento de predicciones teóricas-prácticas.

Métodos prácticos:

Fotografía laboral: clasificación granulométrica del material en la planta piloto del CEDINIQ.

Experimental: método para valorar, preliminarmente, la composición física, mineralógica y térmica de los desechos serpentínicos, y la factibilidad práctica de su uso como material refractario.

2.6 Obtención y procesamiento de las informaciones

Para el procesamiento de los datos e informaciones obtenidas durante el desarrollo de la investigación, se emplearon los programas que se muestran a continuación:

- Microsoft Office Word 2010.
- Microsoft Office Excel 2010.
- Microsoft Office Picture Manager 2010.
- Adobe Photoshop CC 2018.
- Crystallographics Search Match
- Microsoft Paint
- OriginPro 9.0 64Bit

2.7 Materiales empleados para la producción de los materiales refractarios

2.7.1 Materiales empleados para las pinturas refractarias

En la preparación de las pinturas refractarias se utilizaron los materiales que se describen a continuación:

- El rechazo serpentínico con una fracción granulométrica -0, 15 mm.
- Disolvente: el alcohol etílico que posee una adecuada velocidad de evaporación (0, 014 cm³/min) y menor toxicidad que el resto de los disolventes orgánicos empleados y su costo no es elevado, (Pons Herrera J. A., 2000).
- Estabilizador: Aditivos: la Pez rubia puede actuar como un agente aglutinante, mejorando la adherencia de la pintura a la superficie del molde o macho. Además, puede contribuir a la formación de una película protectora que resiste altas temperaturas y mejora el acabado superficial de las piezas fundidas, (Guerrero, 2008).

Mientras que, la cera de abeja y resina de pino, son otras alternativas que se puede emplear en la composición de pinturas refractarias. Es conocida por su maleabilidad, impermeabilidad y resistencia a la oxidación, lo que la hace valiosa en aplicaciones que requieren estabilidad a largo plazo, (Yuastepanov, 1981).

Ambos materiales, se utilizan aprovechando sus propiedades de colofonia, que se compone, principalmente, de ésteres de ácidos grasos y alcoholes alifáticos, lo que le confiere propiedades únicas como su textura y capacidad para resistir altas temperaturas sin deteriorarse fácilmente. En el contexto de las pinturas refractarias, puede ser utilizada para mejorar la adherencia de la pintura, formar una película protectora sobre la superficie del molde o macho, y potencialmente realzar el acabado superficial de las piezas fundidas, (Forehand, 2021).

- NaCl

En sustitución de la pez rubia, se utilizó en este trabajo la resina de pino casuarina de la región de Moa, obtenida de manera tradicional, como se muestra en la figura siguiente.



Figura 17. Proceso de obtención y preparación de las resinas de pino, empleada en la investigación. **Fuente:** Ferrer Batista, 2024.

2.7.2 Materiales empleados para la fabricación de las mezclas de moldeo

Los principales materiales empleados para la conformación de las mezclas de moldeo, empleadas en el taller de fundición, durante las pruebas experimentales se describen a continuación.

- Melaza: subproducto de la producción de azúcar y se utiliza como aditivo en algunas mezclas de moldeo. Sin embargo, su uso específico puede variar según la aplicación y las necesidades de la fundición. Por ejemplo, en la mezcla MR-1 (mezcla única), la melaza se combina con bentonita y arena sílice como aglutinante. Además, en otros contextos, la melaza también se ha utilizado como aditivo desarenante en mezclas

autofraguantes para machos de fundición, (Hernández Ruiz, Rivero, & Valencia Morales, 2017)

- Bentonita no nitrificada: es una arcilla que actúa como aglutinante en las mezclas de moldeo, compuesta principalmente por minerales del grupo de la esméctica, como la montmorillonita y la beidelita. Esta arcilla se define comercialmente sobre una base mineralógica, independientemente de su origen geológico.
- Carbonato de sodio
- Agua.

2.8 Conclusiones del capítulo 2

Con el análisis detallado de los materiales y métodos de investigación empleados para el cumplimiento de los objetivos propuestos se arribó a las conclusiones siguientes:

1. Las vías de selección y preparación de la muestra estuvieron acordes con la metodología existente, garantizando la selección adecuada de las fracciones granulométricas y la confiabilidad de los resultados de la caracterización realizada.
2. Los métodos y técnicas aplicados en la determinación de las características físicas, químicas, mineralógicas y térmicas del material, se corresponden con las utilizadas para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación.
3. Los equipamientos y materiales empleados para evaluar las características tecnológicas de los rechazos serpentínicos como material refractario (arena de moldeo y relleno para pinturas antiadherentes), permiten analizar las propiedades principales de los principales productos a obtener en la investigación (arenas de moldeo y pinturas refractarias).

CAPÍTULO 3. PARTE EXPERIMENTAL

El propósito fundamental de este capítulo, es explicar las características de los experimentos desarrollados con los rechazos serpentiniticos, como materiales refractarios, que permitan corroborar su uso como mezclas de moldeo y pinturas antiadherentes, tomando como base las características que presentan estos rechazos, en función de lograr un tratamiento para el aprovechamiento de estos pasivos ambientales.

La preparación mecánica de las muestras experimentales fue realizada en el CEDINIQ, empleando las instalaciones de la planta piloto y las técnicas analíticas de este centro de investigación, financiadas por el proyecto sectorial del níquel PS104HO001-028 “Desarrollo de nuevos materiales para la fundición en la EMNi”.

El procedimiento seguido en la investigación estuvo basado en las experiencias de trabajos precedentes, donde se emplearon materiales similares existentes en la región de Moa, principalmente, con las dunitas serpentinizadas de las zonas de Merceditas y Amores. El estudio experimental se llevó a cabo considerando que la experimentación se realizó con los rechazos serpentiniticos después de ser preparados en el Centro de Investigación del Níquel (CEDINIQ), mediante el proceso de trituración, molienda y el cribado que se ilustra en la Figura 18, los cuales fueron trasladados hasta el taller de fundición de la empresa mecánica del níquel (EMNi).



Figura 18. Equipos empleados en el CEDINIQ para la clasificación de los rechazos serpentiniticos.

En la Empresa Mecánica del Níquel se realizó la clasificación de tamaño y se emplearon para la investigación los materiales que se describen en el esquema que se ofrece en la Figura 19.

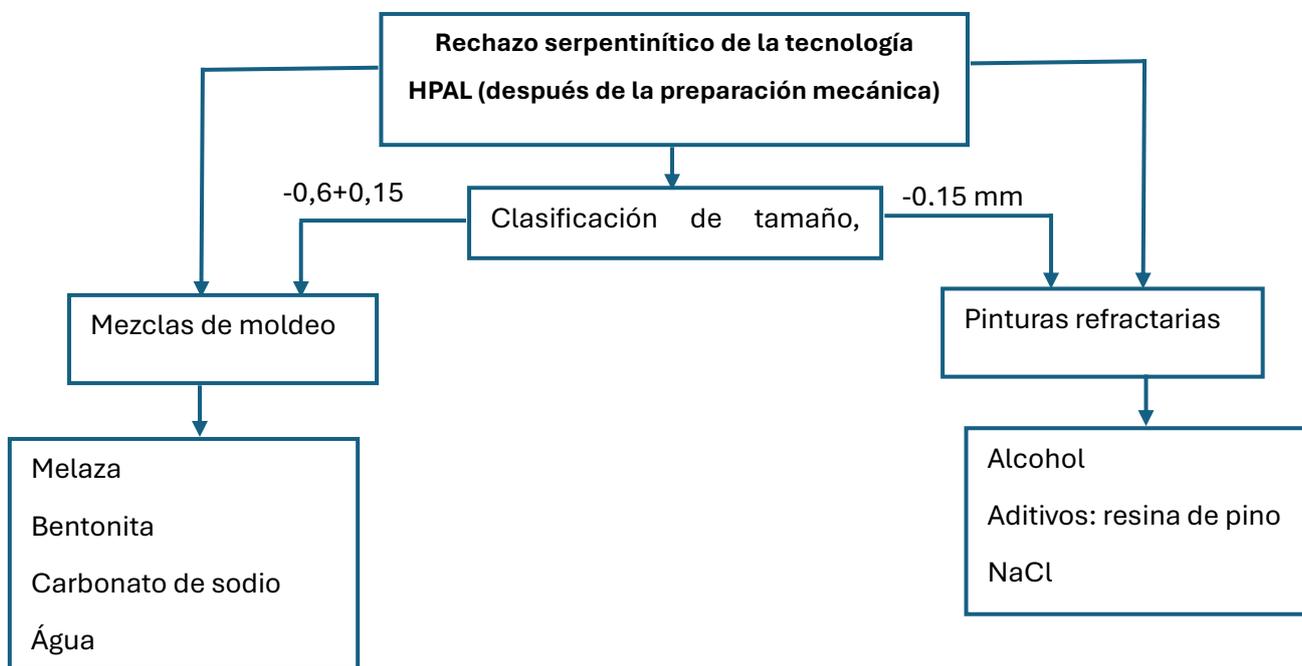


Figura 19. Esquema para la preparación de los materiales refractarios.

Considerando las características que presentan estos materiales, que fueron descritas en el capítulo anterior.

3.1 Procedimiento para la fabricación de las pinturas refractarias

De las formas de lucha contra la penetración, el método más generalizado es el empleo de pinturas y pastas, (Salcines Meriño, 1985), las cuales son suspensiones coloidales que deben cumplir exigentes propiedades, (Titov, (1981); (Enríquez, 1986).

Generalmente, la granulometría del componente refractario empleado para la preparación de pinturas antiadherentes es variable, recomendándose las fracciones menores de 0,10 mm (Titov, (1981); (Enríquez, 1986) sin embargo, este elemento, debe conjugarse con el aspecto económico, de forma tal que se obtenga la de menor costo posible.

Partiendo de este criterio, se realizaron pruebas experimentales con las clases de tamaño menores de 0, 15 mm, con las que se realizaron, finalmente, los ensayos que permitieron evaluar los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL, como relleno refractario para la preparación de pinturas empleadas en piezas de hierro fundido y acero.

La preparación de la pintura refractaria se llevó a cabo en el laboratorio químico de la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel, donde se comprobó los parámetros fundamentales que deben cumplir la pintura según las normas del taller de fundición: 90% de relleno. Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: % de disolución del relleno en alcohol, % de partículas en suspensión y adherencia de la pintura a la superficie del molde.

Se utilizaron proporciones de relleno serpentinitico según los trabajos de investigaciones anteriores, que emplearon materiales de olivino muy similares, desarrollados por Pons Herrera (2000), a los evaluados en esta investigación.

Para la preparación de las pinturas antiadherentes, base alcohol se utilizaron 3,4 kg de rechazos serpentiniticos, 3 L de alcohol y 0,05 kg de NaCl.

El procedimiento empleado para la elaboración de las pinturas refractarias se describe a continuación:

En un recipiente limpio, disolver el alcohol y la pez rubia que fue sustituida por la resina de pino, como alternativa ante la escasez existente en el taller de fundición, hasta obtener una solución homogénea, después añadir la arena obtenida de rechazos serpentiniticos paulatinamente hasta lograr una pintura bien homogénea (se puede realizar manual o con mezcladora), hasta obtener una densidad de 1,3 - 1,5 g/cm³.

La aplicación de la pintura debe ser de forma cuidadosa para que cubra todos los poros e irregularidades de los moldes o machos. Se aplicarán dos manos de pintura para obtener una capa de 0,6 - 1,0 mm.

Durante la aplicación la pintura debe agitarse antes comenzar cada 10 minutos para evitar su sedimentación.

Las brochas para el pintado de los moldes y machos deben de estar en buenas condiciones técnicas, estas deben ser lavadas después de concluida cada jornada.

El secado puede realizarse de dos formas: dejando secar la superficie al aire durante 1,5 - 2 horas sin tapar el molde o flameándolo.

El relleno de pintura a partir de los rechazos serpentiniticos generados por la tecnología HPAL fue aplicado antes de la fundición de piezas de hierro XH4, ver Figura 20 específicamente en bomba de hierro y en los brazos de los hornos de Che Guevara, que están fabricados con acero HK40 ver Figura 21. En ambas figuras siguiente se aprecian los

momentos del proceso de la aplicación de las pinturas en piezas, de ambos tipos de aleaciones, que fueron posteriormente fundidas.



Figura 20. Aplicación de las pinturas preparadas a base de rechazo serpentínico, en los moldes de bomba de hierro fundido. **Fuente:** (Pérez Larduet & de la Paz Cuello, 2024).



Figura 21. Aplicación de pinturas a base de rechazo serpentínico, en los moldes de los brazos de hornos de reducción de acero HK-40. **Fuente:** (Pérez Larduet & de la Paz Cuello, 2024).

El propósito de la aplicación de las pinturas refractarias en los moldes, es que resistan a la temperatura, a la vez que requiera una superficie lisa de alta resistencia a la erosión del metal y buen grado de estancamiento de los poros.

3.2 Procedimiento para la fabricación de las mezclas de moldeo

Para conocer las propiedades necesarias en los moldes a utilizar durante la fusión de las piezas, fue necesario realizar a escala de laboratorio las propiedades de resistencia a la compresión, humedad y permeabilidad en las mezclas de moldeo utilizando arena de olivino, parámetros requeridos en las mezclas de moldeo para la fundición de piezas, según las normas cubanas (NEIB 03-05- 14) por el método de moldeo tradicional o moldeo en verde y las características de vida de banco (V/B), tiempo de desmoldeado (T/D), resistencia a la tracción y permeabilidad por el método de moldeo autofraguante según las firmas División de Burmach Castrol Chemical S.A y Prosider, (Santiesteban Ruiz, 2009).

Los análisis se realizaron en el Laboratorio químico de la UEB de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel con el uso de los rechazos serpentiniticos (olivino) estudiados como arena de moldeo, basado en las características refractarias, granulométricas y estabilidad térmica.

Se emplearon los procedimientos que se desarrollan en el taller para arenas de sílice, que son las que normalmente se utilizan en esta entidad y en gran parte de los talleres de fundición de Cuba. Para ello, se utilizaron las cantidades siguientes: 6% de bentonita no nitrificada, 90% de arena (olivino -1, 5 mm), agua en un 0, 8 % y 3, 2 % de melaza.

De este modo, considerando lo planteado en (Salcines Meriño, 1985) se recogen en la Tabla 7 los requisitos o parámetros que deben cumplir las mezclas de moldeo:

Tabla 7. Requisitos o parámetros que deben cumplir las mezclas de moldeo

Parámetros	Unidad de medida	Intervalo de valores
Humedad	%	3 – 4
Permeabilidad	cm/seg	Mayor de 70
Resistencia a la compresión	kg/cm ²	3 – 5

3.3 Conclusiones del capítulo 3

A partir del desarrollo de la parte experimental de la investigación, se arribó las siguientes conclusiones:

1. Para la realización de las pruebas experimentales con las mezclas de moldeo y las pinturas refractarias, a partir del rechazo serpentínico estudiado, se utilizaron las normas y procedimientos establecidos en los talleres de fundición de Cuba.
2. La preparación mecánica de las muestras experimentales fue realizada en el CEDINIQ, empleando las instalaciones de la planta piloto y las técnicas analíticas de este centro de investigación, financiadas por el proyecto sectorial del níquel PS104HO001-028 “Desarrollo de nuevos materiales para la fundición en la EMNi”.
3. Los materiales refractarios obtenidos, fueron evaluados en condiciones y piezas de tamaño industrial, que permitieron validar los resultados del uso de los rechazos serpentínicos, con una alta confiabilidad y veracidad de su utilización en otros tipos de aleaciones y piezas.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en la caracterización tecnológica de los rechazos serpentiniticos como arenas de moldeo y relleno para pinturas refractarias, considerando los análisis químicos, granulométricos, mineralógicos y térmicos, así también el procedimiento para el tratamiento de estos rechazos serpentiniticos en el taller de fundición de la EMNi.

4.1 Resultados de los análisis químicos, físicos, mineralógicos y térmicos

Los minerales del grupo de las serpentinitas son bastante difíciles de identificar debido a la similitud de sus parámetros de red cristalina, es por ello que para esta investigación nos apoyamos en el conocimiento previo de las características químicas de estos rechazos serpentiniticos, teniendo en cuenta las fracciones que se utilizarían como material refractario (arenas de moldeo y relleno para pinturas refractarias), con el uso de los métodos de difracción de rayos X y el análisis térmico simultáneo.

4.1.1 Resultados de los análisis químicos

En la tabla 8 se muestra la composición química promedio del rechazo serpentinitico, que se caracteriza por el predominio de SiO₂ y MgO, que indican la presencia de minerales de serpentina, además de la cantidad de masa que pierde el material con el incremento de la temperatura, es decir, la pérdida por inmisión (PPI), que constituye el 8,21%.

Tabla 8. Composición química del rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL, (en %).

NiO	CoO	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ²⁺	Fe ³⁺	PPI	SiO ₂ /MgO	MgO/SiO ₂
0,574	0,020	0,164	33,201	0,621	29,160	0,860	2,020	3,340	8,210	0,880	1,140

Por lo que, podemos concluir a partir de estos resultados que, los rechazos serpentiniticos, de la Moa Nickel SA, en su mayoría lo constituyen el dióxido de silicio y el óxido de magnesio (II) muy utilizados en la industria de la construcción; y con un menor contenido los demás elementos en forma de óxidos como son: los óxidos de hierro (II y III), el óxido de níquel (II), el óxido de cobalto (II), óxido de aluminio y cromo (III), la correspondencia de los resultados de estos materiales con trabajos anteriores muestra la posible utilización como material de construcción, así como también como material refractario.

De este modo, analizando la composición química de las dunitas serpentinizadas de las zonas Merceditas y Amores con los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL que se ofrece en la Tabla 9.

Tabla 9. Composición química de las dunitas serpentinizadas de las zonas Merceditas y Amores y de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL

Composición (%)	Dunitas serpentinizadas zona Merceditas	Dunitas serpentinizadas zona Amores	Rechazo serpentinitico tecnología HPAL
SiO₂	38,86	36,51	29,16
Al ₂ O ₃	0,81	0,85	0,86
TiO ₂	0,02	0,02	-
Fe₂O₃	4,32	5,27	3,34
FeO	3,60	2,67	2,02
CaO	0,17	0,11	-
MgO	40,50	39,46	33,20
NiO	0,29	0,30	0,57
Na ₂ O	0,05	0,05	-
K ₂ O	0,05	0,05	-
CoO	0,01	0,01	0,02
Cr ₂ O ₃	0,35	0,37	0,62
P ₂ O ₅	0,02	0,02	-
P.P. I	12,30	14,40	8,21
Total	101,35	100,04	78
MgO/SiO ₂	1,04	1,08	1,14
Fe ₂ O ₃ /FeO	1,20	1,97	1,65

Fuente: Adaptado de Pons Herrera, (2000).

Podemos apreciar la gran similitud en la composición química promedio de las dunitas serpentinizadas presentes en las zonas de Merceditas y Amores con los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL ya que existe un estrecho intervalo de variación, y un alto contenido de óxido de magnesio y silicio.

La relación $MgO/SiO_2 > 1$, se encuentra dentro de los rangos exigidos, para su utilización como material refractario, según plantea (Griffiths, 1989); mientras que los valores de

Fe₂O₃/FeO: 1,2 – 1,9, demuestran las características refractarias de estas rocas, comparadas con las de otras regiones del mundo, (Pons Herrera J. A., 1999).

4.1.2 Resultados de los análisis granulométricos

Como resultado de la molienda de los rechazos serpentiniticos seleccionados en la planta de pulpa nueva se obtuvieron 2 toneladas de arenas de moldeo (- 0, 6 + 0,15 mm) y 1 tonelada de relleno para pinturas antiadherentes (- 0,15 mm) tal como se muestra en el Anexo A.

El análisis granulométrico para el rechazo serpentinitico que tiene lugar para su utilización como material refractario se analiza como se ofrece en la Tabla 10, donde se aprecia la caracterización física del material, para un espectro de diámetro de partículas entre 0, 053 a 0, 85 mm según las normas de las AFS por las que se rigen en el taller de fundición de la EMNi.

Tabla 10. Resultados del análisis granulométrico realizado a los rechazos serpentiniticos estudiados, luego de la preparación mecánica

Clases de tamaño, mm	Salida sumatoria, según retenido, %
+ 0,85	0,0637
- 0,85 + 0,6	0,1631
- 0,6 + 0,42	0,3086
- 0,42 + 0,3	20,6068
- 0,3 + 0,212	26,2832
- 0,212 + 0,15	23,1153
- 0,15 + 0,106	14,6508
- 0,106 + 0,075	7,9312
- 0,075 + 0,053	5,6264
- 0,053	0,5082

Los principales resultados de los análisis granulométricos realizados a los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL en Moa, arrojaron como resultados principales que las fracciones - 0, 6 + 0, 15 mm, existe un predominio de las fracciones – 0, 3 + 0,10 mm, que puede ser empleado como arena de moldeo, como se muestra en el gráfico 1.

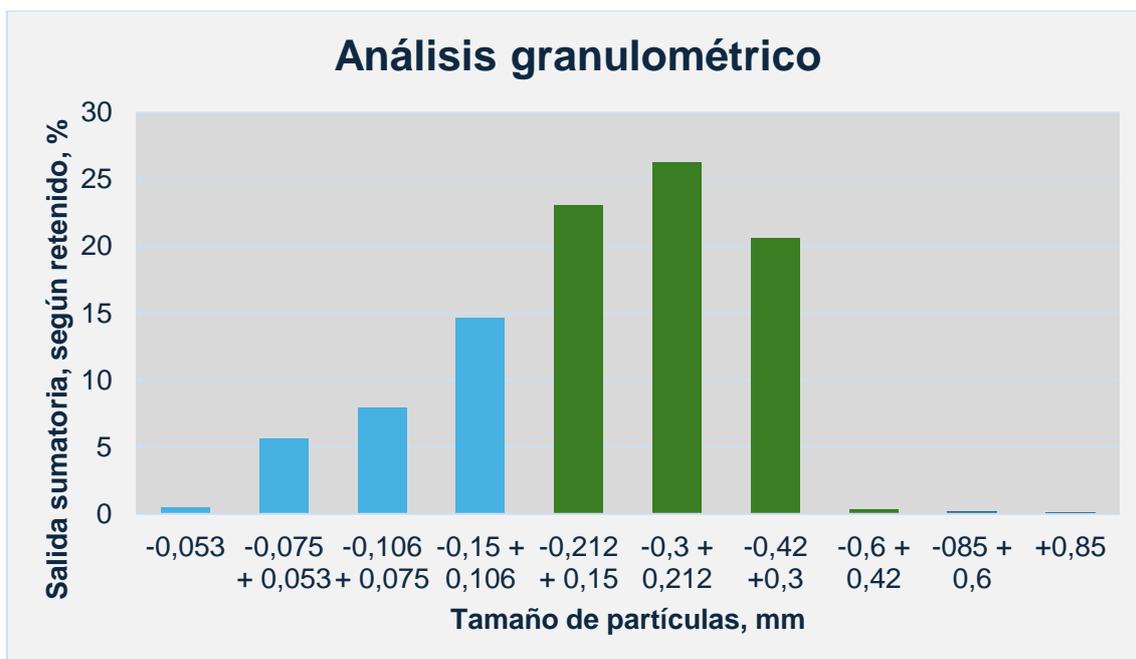


Gráfico 1. Características granulométricas del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL

Mientras que las fracciones menores de 0, 15 mm representan alrededor del 30 % del material, el cual fue utilizado como relleno para pinturas refractarias debido a que garantizan un buen acabado superficial de las piezas fundidas, con vistas a la formación de soluciones coloidales durante la preparación de las pinturas.

4.1.3 Resultados de los análisis mineralógicos

Los análisis mineralógicos, se realizaron para las arenas de moldeo, tal como se ilustra en el Gráfico 2 y para el relleno de las pinturas refractarias, donde se puede apreciar la Lizardita, el Crisotilo y la Dolomita como fases mineralógicas principales.

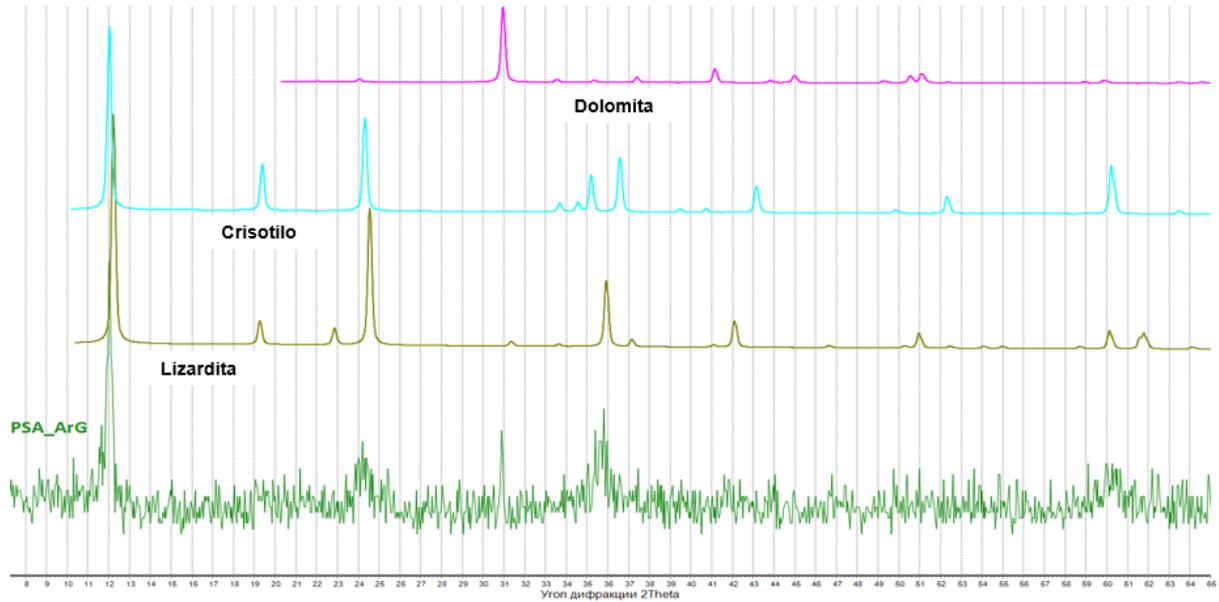


Gráfico 2. Difractograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL, empleado como arena de moldeo

En cuanto al relleno para las pinturas refractarias que se muestra en el Gráfico 3, predominan minerales de serpentina, los cuales están representados por lizardita y crisotilo principalmente, no obstante, se destacan fases de dolomita, cuarzo y magnesita.

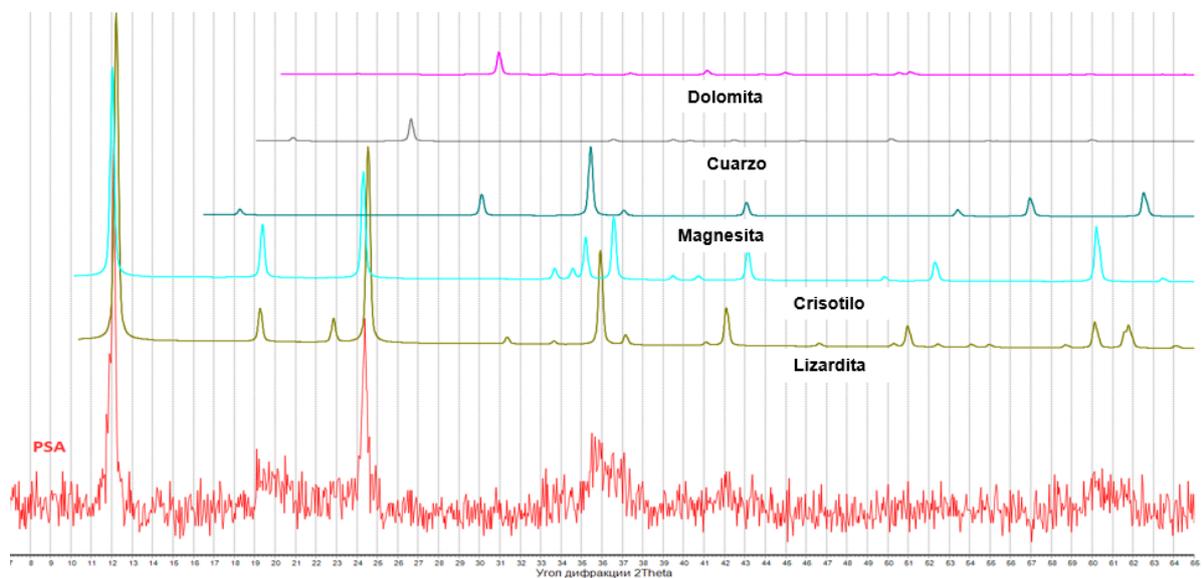


Gráfico 3. Difractograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL, empleado como relleno para pintura refractaria

En ninguno de los difractogramas analizados para el relleno de las pinturas refractarias y las mezclas de moldeo se detectó la presencia de fases minerales de hierro, se demuestra que la

fase fayalita no es significativa en este tipo de material, por tanto, no limita su uso como refractario, consideradas como una de las principales impurezas que afectan a los minerales refractarios, de modo que puede apreciarse en ambas muestras de rechazo los minerales de serpentina como fases mineralógicas principales.

Los principales estudios geológicos realizados sobre las características petrográficas del complejo ofiolítico Moa - Baracoa, señalan que una de las etapas primarias que marcan el proceso de alteración de las rocas que lo conforman, están relacionados, precisamente, con el fenómeno de serpentinización, donde se produce el reemplazamiento parcial del olivino por minerales del grupo de la serpentina.

La serpentinización se entiende como un proceso hidrotermal en el que los minerales de magnesio se transforman en serpentinas como resultado de la hidratación, (Петров, 2012). Estos últimos forman un grupo de minerales de composición similar, cuyos representantes más comunes son la lizardita, crisotilo y antigorita. Las rocas suelen estar compuestas por asociaciones lizardita – crisotilo, crisotilo – lizardita – antigorita, crisotilo – antigorita. La antigorita es a menudo (pero no siempre) el mineral más reciente y refleja el proceso de metamorfismo progresivo.

Sin embargo, al ocurrir la serpentinización de la roca total o parcial, a través de fisuras aparecen como resultado junto a los minerales primarios residuales, asociados al grupo de la serpentina (antigorita, crisotilo), talco, anfíboles fibrosos, cloritas, calcita, dolomita, espinelas (magnetita, cromita), saponitas, etc, que dan origen a rocas con elevadas concentraciones de Mg, con una evolución fuertemente heterogénea por la presencia conjunta de minerales muy solubles con otros escasamente meteorizables, Aguilar et al., (1998), lo que explica la presencia en estos rechazos de dolomita.

De este modo al establecer una comparación con los difractogramas obtenidos durante el análisis de las dunitas serpentinizadas de la zona de Merceditas y Amores (sin calentar) y los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL, confirman la presencia de la Antigorita $[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$, como fase mineralógica predominante en las dunitas, mientras que en los rechazos serpentiniticos el crisotilo y lizardita, fases muy semejantes entre sí, resultados que se afirman en trabajos como los de, Frost (1985); Gervilla (1996); Proenza (1997), como elemento común, la presencia de la Forsterita como fase secundaria, lo que demuestra el variado grado de serpentinización que poseen estas rocas y en especial el mineral de olivino,

que forma parte fundamental de las mismas resultado similar al obtenido por (Pons Herrera J. A., 1999).

4.1.4 Resultados de los análisis térmicos

Los métodos de análisis térmico sincrónico (STA) demostraron su eficacia, al poder determinar el comportamiento térmico de los rechazos serpentínicos, durante su calentamiento a una velocidad de 10 °C/min. Durante su calentamiento, se produce una reacción endotérmica con un pico característico en el rango de temperatura ~620 – 820 °C, proceso que va acompañado de la deshidratación de esta materia prima, y una reacción exotérmica en el rango de temperatura entre 800 y 840 °C, asociado a la descomposición estructural, formación de forsterita y liberación de grupos OH residuales, proceso coincidente con los resultados de muestras similares evaluadas en Rusia, [-(Попов Ю.В., 2022); (Попов, 2019); (Földvári, 2011)].

Con el resultado de los análisis de termogravimetría simultánea (STA) fue posible evaluar el comportamiento térmico de los rechazos serpentínicos estudiados lo que, unido a los análisis mineralógicos, explican las principales transformaciones físico - químicas que experimentan estos materiales con el incremento de la temperatura.

Hasta la temperatura 208 °C ocurre la eliminación del agua higroscópica que acompaña el mineral, donde se mantiene como fase principal la serpentina, en la que existe una pérdida de masa de 2 % correspondiente a la temperatura de transición vítrea. En el Gráfico 4 se ilustra el termograma que muestra el comportamiento de los rechazos serpentínicos en este intervalo de temperatura.

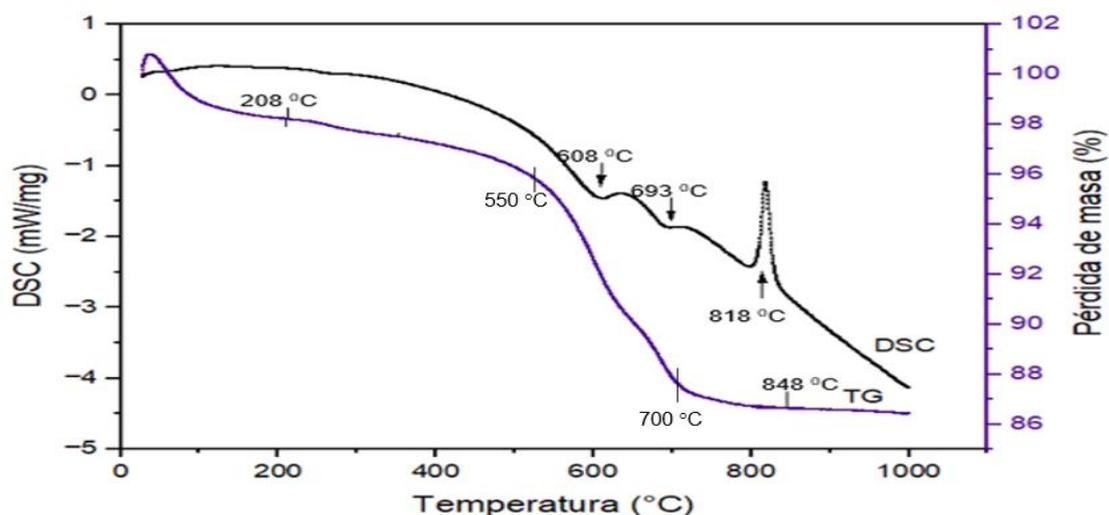


Gráfico 4. Termograma del rechazo serpentínico de la tecnología HPAL

Entre los 550 – 700 °C se verifica un largo proceso de eliminación del agua estructural, en el que se asocia una pérdida de masa de, aproximadamente, un 11%, donde se tiene como fases principales la lizardita y el crisotilo, mientras que tiene como fase secundaria la forsterita, cuya presencia está asociada en lo fundamental al inicio del proceso de recristalización de los minerales de olivino, con la iniciación del desprendimiento de los grupos oxidrilos presentes en esta materia prima donde se pueden observar dos picos endotérmicos a los 608 °C y a los 693 °C asociado a estas transiciones.

A partir de los 720 °C hasta los 848 °C, se verifica la completa recristalización y reestructuración de los minerales de olivino, con la formación de una nueva fase, asociada al desprendimiento de los oxidrilos, con un pico exotérmico a los 818 °C, característico de los minerales serpentiniticos de la región de Moa-Baracoa, coincidentes con los trabajos de publicados por Pons Herrera en el año (2000).

Precisamente en este intervalo se verifica además la transformación de los minerales de la serpentina en la forsterita, considerando como un proceso reversible del fenómeno de serpentización de los minerales de olivino presentes en los rechazos serpentiniticos. Este proceso puede ser explicado mediante la ecuación 1 de reacción química:



Serpentina Forsterita

De modo que a la temperatura de 848 °C ocurre la formación de los cristales de este material, y la estabilización del olivino como fase principal, y la Forsterita, como la predominante en esta materia prima, que justifican científicamente, su utilización como material refractario, ya que la misma alcanza su temperatura de fusión alrededor de los 1 800 °C, coincidente con las investigaciones de Proenza Fernández, (1997) y Pons Herrera, (2000).

Estos resultados demuestran que estamos en presencia de minerales serpentiniticos donde existe un predominio de las fases mineralógicas Lizardita y Crisotilo con fases secundarias de forsterita, lo que posibilita la toma de decisiones en cuanto a su posible utilización como material refractario.

De este modo, al establecer una comparación de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL con las dunitas serpentinizadas de las zonas de Amores y Miraflores en cuanto a la pérdida de masa en las diferentes etapas del proceso de descomposición térmica, se puede apreciar según la Tabla 11, que estos minerales fluctúan en un pequeño intervalo en cuanto a

los % de pérdidas de masa y muestran como fases principales elementos del grupo de la serpentina y su posterior transformación en forsterita.

Tabla 11. Pérdida de masa del proceso de descomposición térmica de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa y los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL

Muestras	ΔT °C	Pérdida de masa		Fases principales
		mg	%	
Merceditas	25 – 220	8,24	2,16	An
	220 – 550	9,8	2,58	An
	550 – 760	19,4	5,10	An y Fo
	760 – 900	2,8	0,74	Fo
	Total	40,24	10,6	An y Fo
Amores	25 – 235	18,2	3,71	An
	235 – 570	21,8	4,44	An
	570 – 760	27,04	5,51	An y Fo
	760 – 900	2,16	0,44	Fo
	Total	69,2	14,1	An y Fo
Rechazo serpentinítico	27 – 208	1,45	1,88	Liz y Cris
	208 – 550	4,18	5,42	Liz y Cris
	550 – 693	1,20	1,56	Liz, Cris, Fo
	693 – 848	3,49	4,53	Fo
	Total	10,32	13,39	Liz, Cris, Fo

Fuente: Adaptado de Pons Herrera, (2000).

4.2 Resultados de la caracterización tecnológica del relleno para pintura refractaria

El relleno para pintura refractaria preparado con el uso de los rechazos serpentiniticos (Anexo B) arrojó buenos resultados, debido a que, al aplicarse a diferentes tipos de piezas, según el tipo de aleación, volumen, importancia y complejidad, la calidad final de las piezas, se correspondió con los estándares de calidad exigidos por el taller de fundición, y reconocidos por los especialistas de las áreas de calidad y producción de la EMNi.

De este modo estas pinturas permitieron reforzar el acabado superficial de la pieza y reducir los defectos que aparecen en la interfaz arena – metal, tal como se muestra en la Figura 22 en la misma se aprecia una de las piezas de hierro fundido empleando como relleno para las pinturas refractarias los rechazos serpentiniticos de Moa Nickel.



Figura 22. Bomba pintada empleando como relleno el rechazo serpentinitico de la tecnología HPAL

Al aplicar este tipo de pintura a piezas más voluminosas y complejas, como los brazos de los hornos de reducción de la Empresa Che Guevara, los resultados fueron buenos, no apreciándose grietas, ni sopladuras, con un buen acabado superficial, acorde con las normas de calidad de la empresa.

Según la experiencia de los técnicos del taller de fundición de la empresa Mecánica del Níquel, se forma una capa lisa y con un buen espesor, igual que cuando se usa otra pintura refractaria, con lo que debe dar una buena calidad superficial de la pieza fundida. Además, el proceso de secado fue similar y con la misma velocidad a como se realiza normalmente a los moldes pintados.

4.3 Resultados de la caracterización tecnológica como mezclas de moldeo

Para la obtención de piezas de hierro y acero, se analizaron las propiedades de las mezclas de moldeo preparadas con los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL.

Tabla 12. Propiedades de las mezclas preparadas con los rechazos serpentiniticos de tecnología HPAL.

Muestras	Resistencia a la compresión		Humedad, %	Permeabilidad cm/seg
	N/cm ²	kg/cm ²		
1	32,2	3,1	4,0	122
2	35,1	3,5	3,8	131
3	34,7	3,5	3,9	128
Promedio	34	3,4	3,9	127

Como se aprecia en la tabla 12, todas las mezclas preparadas cumplen con los requisitos exigidos, para este tipo de producto, fundamental para garantizar la calidad de las piezas fundidas.

Las mezclas de moldeo fueron evaluadas durante el desarrollo de la tecnología de fundición para piezas de aleaciones ferrosas, comprobándose las propiedades refractarias y factibilidad técnica de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL en Moa, para su posible utilización como arena de fundición.

4.4 Procedimiento para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos

Con los elementos analizados en la investigación, el procedimiento que se propone para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos como material refractario.

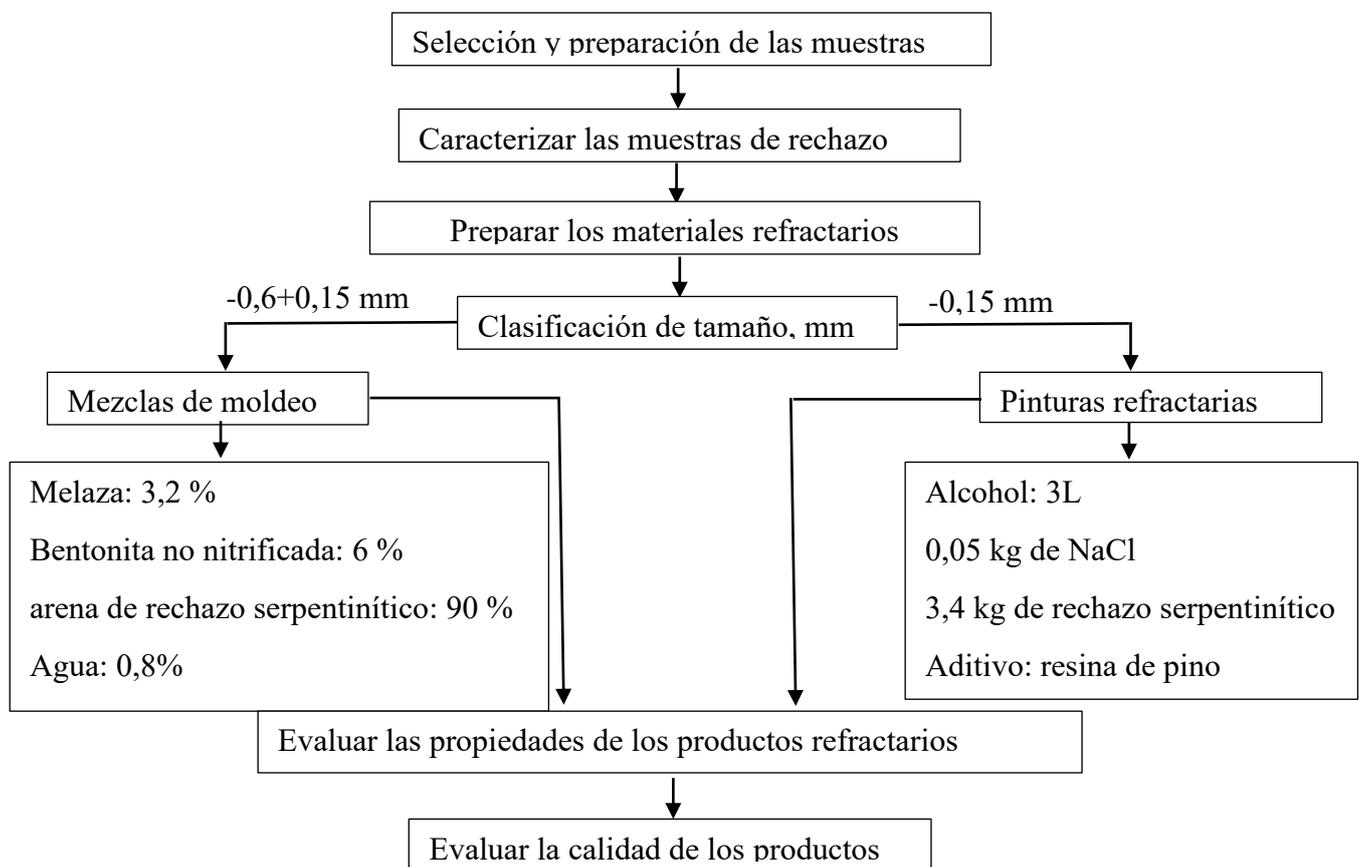


Figura 23. Esquema para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos como material refractario.

A partir del esquema 23 se describen a continuación las etapas que incluye el procedimiento para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos:

1. Selección y preparación de las muestras

En esta etapa se seleccionan a partir de las características visuales y físicas los rechazos serpentínicos debido a que estos se acumulan sin posterior utilización, considerando para ello los métodos de muestreo que garanticen la representatividad de las muestras. Esta selección puede efectuarse en los depósitos de rechazos serpentínicos de la nueva planta de pulpa de la tecnología HPAL o en el terreno al no ser seleccionados como materia prima para el proceso tecnológico de la planta.

Luego de esta selección, estos materiales se trasladarían a la planta piloto del CEDINIQ para su preparación mecánica con vistas a reducir el tamaño de las partículas mediante los procesos de trituración, molienda y cribado hasta obtener una granulometría para los que puedan ser empleado como materiales refractarios ya sea relleno para pinturas refractarias y mezclas para moldeo.

2. Caracterización de las muestras

Con el propósito de determinar las características físico – químicas de las muestras a ser probadas en el taller de fundición de la EMNi se realiza una caracterización exhaustiva de estos materiales que incluye la determinación de los contenidos de los minerales presentes en estas materias primas para su posterior utilización como material refractario mediante los análisis químicos.

3. Obtención de los materiales refractarios a partir de los rechazos serpentínicos

Después de la caracterización de los rechazos serpentínicos realizados en la planta piloto del CEDINIQ para su procesamiento y obtención estos rechazos serpentínicos son trasladados a la EMNi para obtener según las normas establecidas en el taller de fundición las mezclas de moldeo y las pinturas refractarias, considerando en este aspecto el método de clasificación de la sociedad de fundidores americanos AFS que es la que se aplica en el taller de fundición.

Para la preparación de las pinturas en las que se emplea como relleno los rechazos serpentínicos se emplearon las fracciones – 0,15 mm, siguiendo las normas establecidas en el taller de fundición, con un 90% de relleno, teniendo en cuenta los siguientes parámetros tecnológicos: % de disolución del relleno en alcohol, % de partículas en suspensión y adherencia de la pintura a la superficie del molde, en la que se emplean las dosificaciones siguientes: 3, 4 kg de rechazos serpentínicos, 3 L de alcohol y 0, 05 kg de NaCl y como estabilizador la pez rubia o las alternativas de resina de pino y cera de caña.

Mientras que para las mezclas de moldeo se utilizaron 6 % de bentonita no nitrificada, 90 % de arena, agua en un 0,8 % y un 3,2 % de melaza.

4. Uso en los talleres de fundición, según el tipo de aleación a fundir

Los materiales obtenidos se utilizarán con diferentes proporciones atendiendo al tipo de aleación requerido ya sea para la fabricación de aceros, hierro fundido y aleaciones no ferrosas, lo que determinaría el comportamiento de las propiedades tecnológicas.

5. Evaluar las propiedades que deben cumplir los productos refractarios en el taller de fundición

En esta fase, se procederá a medir las propiedades que deben cumplir los productos refractarios en el taller de fundición de la EMNi. Las mediciones incluirán:

- **Propiedades mecánicas:** resistencia a la compresión, permeabilidad.
- **Propiedades superficiales:** espesor y densidad de las pinturas aplicadas.

Así también, la humedad de las arenas para la mezcla de moldeo.

6. Desmoldear y evaluar la calidad de las piezas fundidas, utilizando el rechazo serpentínico

Finalmente, tras el proceso de fundición, se procederá al desmoldeo y evaluación de la calidad de las piezas obtenidas a partir del rechazo serpentínico. Este paso implica:

- **Inspección visual:** Verificar la integridad física y estética del producto que incluye el análisis de la superficie, la calidad, el acabado superficial y la presencia de defectos como rechupes, rebabas.

4.5 Conclusiones del capítulo 4

1. El empleo del rechazo serpentinitico, asegura al taller de fundición de la EMNi un significativo ahorro de recursos debido a las facilidades de extracción, preparación y transportación de este material en el propio municipio de Moa.
2. Las principales características químicas, físicas, mineralógicas y térmicas de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL, garantizan su utilización como material refractario en el taller de fundición de la EMNi.
3. Los análisis químicos de los rechazos serpentiniticos presentan gran similitud con los de las dunitas serpentinizadas de las zonas de Merceditas y Amores perteneciente al complejo ofiolítico Moa – Baracoa, con gran predominio de los óxidos de magnesio y silicio, con fases mineralógicas principales de los minerales del grupo de la serpentina (lizardita, crisotilo y antigorita), lo que demuestra que los resultados obtenidos se fundamentan en los antecedentes de la investigación.
4. Los rechazos serpentiniticos presentan a los 208 °C una pérdida de masa de 2% asociado a la eliminación del agua higroscópica y de los 350 a 848 °C una pérdida de masa de un 11% correspondiente a la reestructuración y recristalización de los minerales de serpentina, donde se aprecian dos picos endotérmicos asociados a estas transiciones a los 608 y 693 °C, respectivamente.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los rechazos serpentiniticos generados por la tecnología HPAL en Moa, se caracterizan por poseer excelentes propiedades refractarias, que justifican su uso como arenas de moldeo y pinturas antiadherentes.
2. Se comprobó que los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL, poseen características tecnológicas que facilitan la toma de decisiones sobre su posible uso como material refractario.
3. Como resultado de la caracterización de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL en Moa se comprobaron los resultados siguientes:
 - ✓ Existe un predominio de los óxidos de Magnesio (33, 2 %) y Silicio (29, 2%), en los rechazos serpentiniticos estudiados, con fases principales de serpentinas (Lizardita, Crisotilo),
 - ✓ El comportamiento térmico de esta materia prima se caracteriza por: dos efectos endotérmicos principales; a los 208 °C, una pérdida de masa de 2% asociado a la eliminación del agua higroscópica y entre 650 - 700 °C una pérdida de masa de un 11 % correspondiente a la reestructuración y recristalización de los minerales de serpentina. Entre 720 y 848 °C se consolida la presencia de la fase forsterita con un efecto exotérmico a los 818 °C, que fundamentan el uso de esta materia prima como material refractario.
4. Técnicamente, es factible el uso de este material para la conformación de pinturas refractarias (con tamaño menor de 0, 15 mm) y arena de moldeo (- 0, 6 + 0, 15 mm), cumpliendo con las características tecnológicas establecidas en el taller de fundición, expresadas en: resistencia a la compresión de 3, 3 kg/cm², humedad de 3, 9 % y una permeabilidad de 127 cm/seg.
5. El procedimiento desarrollado para el tratamiento de los rechazos serpentiniticos de la tecnología HPAL, permite la reutilización industrial de un residual de la industria cubana del níquel, factible de implementar con la participación conjunta de las Empresas Moa Nickel S.A – CEDINIQ - EMNi.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el uso de otros materiales similares existentes en la región de Moa-Baracoa, como los residuales serpentínicos de la antigua mina de Cayo Guam y Empresa Che Guevara de Moa, reconocidos por sus propiedades refractarias.
2. Evaluar el uso de estos materiales en otros talleres de fundición del país.
3. Caracterizar y evaluar el uso de los rechazos serpentínicos generados por la tecnología CARON en Moa.
4. Evaluar la cera caña y de abejas en la conformación de pinturas antiadherentes en sustitución de la pez rubia.
5. Evaluar los rechazos serpentínicos para la confección de ladrillos refractarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Ruiz, J., Calvo de Anta, R., Fernández Ondoño, E., & Macías Vazquez, F. (1998). *Geoquímica de la alteración y edafogénesis de rocas serpentinizadas de la Sierra Bermeja (Malaga)*. España: Sociedad Española de la Ciencia del Suelo.
- Aleixandre Ferrandis, V., & González Peña, J. (1972). *Propiedades tecnológicas de refractarios de forsterita obtenidos a partir de la Serpentina del Barranco de San Juan (Granada)*. Madrid: Instituto de Cerámica y Vidrio .
- Alfran. (2024). *Qué son los materiales refractarios*. Obtenido de <https://alfran.com/que-son-los-materiales-refractarios/>
- Álvarez Ortiz, A. (2020). *Caracterización de Pasivos Ambientales Mineros del Yacimiento Moa Oriental, para su uso sostenible*. Informe técnico, Universidad de Moa "Dr. Antonio Nuñez Jiménez", Moa.
- Anidos, S. (2007). *Valoración geólogo – técnica de las perspectivas de empleo de los desechos serpentiniticos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como materiales de construcción alternativos*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico , Moa.
- Auxiliar Industrial S.A. (2002). *Arenas para fundición*. AENOR.
- Bautista Zamora, D. (2017). *Evaluación de los desechos serpentiniticos y desechos de arena sílice para el empleo como árido fino asfáltico en Moa*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Casals Corella, C. (1986). *Las Serpentinitas en la Construcción de Obras Hidráulicas*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- CEDINIQ. (2022). *Reporte de análisis Químico a Muestras de Escoria de la Empresa EMNI*. Moa: Centro de Investigación y Desarrollo del Níquel.
- Céspedes Rivera, A. (2007). *Caracterización y perspectivas de uso del rechazo serpentinitico de la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico , Moa.

- Céspedes Rivera, A. (2010). *Caracterización y perspectivas de uso de los desechos sólidos de la planta de pulpa de la Empresa Pedro Soto Alba-Moa Nickel S.A. como árido para la construcción*. Tesis de maestría, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Domínguez Carretero, D., & Proenza Fernández, J. e. (2024). The Geology, Geochemistry, and Mineralogy of the Moa Bay Ni Laterite Mining District, Cuba. *Economic Geology*, *V. 30 (20)*, 20-33.
- Doroni, G. (2020). La actividad minera y los pasivos ambientales. *Revista de la Facultad de Derecho*, 311-322.
- Enríquez, G. (1986). *Manual del fundidor*. Ciudad de la Habana: Editorial Científico - Técnica.
- Falappa, M. B., Lamy, M., & Vazquez, M. (2019). *De una economía lineal a una economía circular, en el siglo XXI*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Ferreiro Guerrero, Y., Leyva Ramirez, E., Leyva González, O. S., Sánchez Cruz, A., & et.al. (2007). Determinación de la refractariedad de una muestra de concentrado de cromitas del Yacimiento. *Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba*, 1-8.
- Ferrer Batista, A. (2023). *Tratamiento de los rechazos serpentiniticos de la planta de pulpa Moa Nickel S.A para su uso como material refractario y de construcción*. Moa.
- Ferrer Batista, A. (2024). *Caracterización de las muestras de rechazo serpentinitico de la empresa Moa Nickel S.A*. Rostov del Don: Universidad Federal del Sur.
- Földvári, M. (2011). *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*. Budapest.
- Forehand, S. (2021). *5 claves en pinturas refractarias para reducir defectos en piezas fundidas*. HA International. Obtenido de https://www.ha-international.com/hubfs/pdfs/HA_SP_SS_2020_Fall.pdf
- Formel, C. e. (1982). *Relación entre el relieve y las cortezas de intemperismo del Nordeste de Oriente*. Cuba.
- Frost, B. (1985). On the stability of sulfides, oxides and native metals in serpentinite. *Journal Petrology*, 31 - 63.

- Gómez Matos, A. (2011). *Caracterización de los desechos serpentiniticos de la mina de la Empresa Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A para su empleo como material de la construcción*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Ganesh Persaud, A. (2014). *Metodología para el inventario de los pasivos ambientales minero-metalúrgicos, generados por las industrias del níquel en Moa*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Gervilla, F. (1996). Parágensis de alteración de rocas ultramáficas serpentinizadas. *Boletín Geológico y Minero*.
- Grey Medina, S. I. (2010). *Influencia de la granulometría de la Arena Sílice en el consumo de resina y catalizador en la mezcla de moldeo autofraguante en la Unidad Estatal Básica de la Empresa Mecánica del Níquel*. Moa: ISMMM.
- Griffiths, J. (1989). *Olivine. Volumen the key to success*. Industrial Minerals.
- Guerrero, A. (2008). *Evaluación de la sustitución de la arena de cromo por arena de sílice en la fabricación de piezas de acero al manganeso*. Moa.
- Guideao Pires, C. A. (2019). *Preparación del mineral de dunitas de Cayo Guam como pintura refractaria*. Informe técnico, Universidad de Moa "Dr. Antonio Nuñez Jiménez", Moa.
- Hernández Ruiz, J. E., Rivero, P., & Valencia Morales, E. (2017). *Desarrollo de una mezcla autofraguante para machos de fundición con sulfato de sodio y melaza*. Revista Cubana de Ciencia y Tecnología de los Materiales. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2223-48612017000400001&script=sci_arttext
- Herrera Casas, S. S. (2018). *Caracterización del rechazo de la planta de preparación de mineral del yacimiento Moa Oriental, para su posible uso industrial*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Hrsak, D., Sucik, G., & Lazic, L. (2008). *The thermophysical properties of serpentinite*. Croatian Metallurgical Society (CMS).
- Inoriza, R. (2003). *Introducción a los materiales refractarios*.
- Iturralde -Vincent, M. (1994). *Geología de las ofiolitas. En ofiolitas y arcos de islas volcánicas de Cuba*. La Habana: International Geological Correlation Program.

- Jerez, O., Leyva, C., & Pons, J. A. (1995). *Estudio geólogo - tecnológico de las cortezas caoliníticas*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Jiménez Barthelemis, L. d. (2008). *Estudio de la preparación mecánica de los minerales serpentiniticos en trituradoras de mandíbulas para la utilización de sus productos en la industria de los materiales de la construcción*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Kattel, V. (2017). *Valoración técnica de los desechos serpentiniticos de la empresa Moa Nickel S.A como material de construcción alternativo*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Lara Negronis, I. A. (2018). *Evaluación de los residuos sólidos de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba para ser empleadas en la elaboración de mezclas asfálticas*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Lavaut Copa, W. (2001). *Caracterización del mineral de rechazo por el proceso de Planta de Preparación de Pulpa*. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Leyva, R. P. (1995). Posibilidades de utilización de materias primas minerales de la región de Moa, como materiales refractarios y aislantes térmicos en la industria del níquel. *Revista Minería y Geología*, 3(3).
- López Peña, L. (2006). *Caracterización geológica de las materias primas de los municipios de Moa-Sagua de Tánamo y su empleo como áridos para la construcción*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Maza Vivanco, D. (2024). *Sostenibilidad en la industria: materiales refractarios y su impacto ambiental*. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Montero Gil, E. (2007). *Caracterización y perspectivas de uso del rechazo de la Empresa Pedro Sotto Alba - Moa Nickel S.A como árido*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Moa.
- Montero Gil, E. (2020). *Gestión del Pasivo Ambiental "Rechazo serpentinitico" del yacimiento Moa Occidental*. Tesis de maestría, Universidad de Moa "Dr. Antonio Nuñez Jiménez", Moa.
- Oyarzun, R. (2011). *Introducción a la Geología de Minas*. Universidad Complutense, Madrid.

- Pedro Sotto Alba Moa Nickel S.A Subdirección de producción. (2018). *Manual de operaciones nueva planta de pulpa*. Moa: Moa Nickel S.A.
- Pérez Larduet, A., & de la Paz Cuello, E. d. (2024). *Evaluación de los rechazos serpentiniticos de las Planta de preparación de mineral de las empresas Moa Nickel S.A y Ernesto Che Guevara de Moa*. Informe técnico, Moa.
- Pérez Stest, J. (2009). *Caracterización y evaluación del desecho serpentinitico de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara como áridos para la obtención de hormigones hidráulicos*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico , Moa.
- Ponce Seoane, N., & Díaz Comesañas, J. L. (2011). *Pasivos Ambientales Mineros en Cuba. Bases metodológicas*. La Habana.
- Pons Herrera, J. A. (1999). *Caracterización de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa,, zonas Merceditas y Amores*. Tesis de Maestría, ISMMM, Moa.
- Pons Herrera, J. A. (2000). *Obtención de productos refractarios a partir de dunitas serpentinizadas de la región de Moa - Baracoa, Zonas Merceditas y Amores*. Moa: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- Pons Herrera, J. A. (2000). *Obtención de productos refractarios para la fundición, a partir de las dunitas serpentinizadas de la región de Moa, zonas "Merceditas y Amores"*. Tesis doctoral, Moa.
- Pons Herrera, J. A., & Leyva Rodríguez, C. A. (1996). Empleo de las arcillas ferro - caolinítica - gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. *Revista Minería Geología, XIII(3)*, 93-96.
- Pons Herrera, J. A., Leyva Rodríguez, C. A., & Fiol, A. (1998). Características generales de las dunitas de la zona Merceditas, Moa, provincia Holguín. *Minería y Geología* , 43 - 48.
- Pons Herrera, J. A., Leyva Rodríguez, C. A., Ramírez Pérez, M. C., Kulachkov, L. V., Salazar Moreno, A., González Pontón, R., & Aleman Trotman, I. (2005). *Perspectivas de Cuba en la producción de materiales refractarios básicos*.
- Pons Herrera, J. A., Leyva Rodríguez, C. A., Rodríguez Martínez, G., Ramírez Pérez, M. C., & et.al. (2000). Características físico - químicas de las dunitas serpentinizadas de la

- región de Moa - Baracoa (Zonas Amores y Miraflores). *Revista Minería Geología*, 95 - 99.
- Pons Herrera, J. A., Leyva, C., & Cobas, F. (1995). *Aplicación de las arcillas caolinitias del yacimiento Centeno como revestimiento de cazuelas*. Informe técnico, ISMMM, Moa.
- Pons Herrera, J. A., Ramírez Pérez, M. C., Quintana Puchol, R., Andrés, S. M., Montero Gil, E., Álvarez Ortiz, A., & et.al. (2019). Comportamiento térmico y mineralógico de las dunitas serpentinizadas de la región Moa - Baracoa bajo temperaturas de hasta 1 600 °C. *Revista Minería y Geología*, 183-193.
- Pons Herrera, J., Pérez, R., María, & Ortiz Bárcenas, J. (2021). Uso Sustentable de los Pasivos Ambientales Minero Metalúrgicos Sólidos, generados por la Industria del Niquel en Moa, Cuba. *Revista Angolana de Geociencias*, 145-154.
- Proenza Fernández, J. (1997). *Mineralizaciones de cromita en la faja ofiolítica Mayarí - Baracoa (Cuba). Ejemplo del yacimiento Merceditas*. Universidad de Barcelona , Barcelona.
- Rodríguez Pacheco, R. (1985). *Materiales serpentiniticos en la construcción de presas de materiales locales* . España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Russi, D., & Martínez Alier, J. (2003). Los pasivos ambientales. *Iconos*(15), 123-131.
- Salcines Meriño, C. M. (1985). *Tecnología de fundición*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Santiesteban Ruiz, J. M. (2009). *Evaluación de las mezclas de moldeo autofraguantes con diferentes proporciones de arena, catalizador y resina*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Sotomayor Cabrera, A. (2016). *Remediación de pasivos ambientales mineros como estrategia para el cuidado del ambiente*. Universidad de Lima.
- Strelov, K. (1975). *Estructura y propiedades de los refractarios* . Moscú: MIR.
- Suárez Lisca, L. H., Coello Machado, N. I., & Cruz Pérez, J. C. (2022). Determinación de las principales características de mezclas de moldeo con aditivos refractarios. *Revista Centro Azúcar*. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v49n3/2223-4861-caz-49-03-1.pdf>

- Terrero Aguirre, I. (2011). *Utilización de los desechos serpentiniticos del mineral extraído de la mina Pedro Sotto Alba como material de construcción alternativo*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Titov, N., & Stepanov, Y. (1981). *Tecnología de los procesos de fundición*. Moscú: Editorial Mir.
- Wilson Masó, R. (2008). *Caracterización de las serpentinitas del municipio de Holguín como áridos para la construcción*. Informe técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.
- Yuastepanov, N. (1981). *Tecnología del proceso de fundición*. Moscú: MIR, Moscú.
- Петров, О. (2012). *Геологический словарь*. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ.
- Попов Ю.В., П. О. (2022). *МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ СЕРПЕНТИНИТОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ФОРМАЦИОННОГО И ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА*. Ростов-на-Дону– Таганрог: ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ.
- Попов, Ю. Ж. (2019). *Минеральный состав серпентинитов тектонического меланжа Даховского кристаллического выступа (Большой Кавказ)*. Геология и геофизика Юга России.
- Феррер Батиста, А., Понс Эррера, Х. А., Ю.В, П., & Рамирес Перес, М. К. (2024). *ХАРАКТЕРИСТИКА СЕРПЕНТИНИТНЫХ ОТХОДОВ ТЕХНОЛОГИИ НРАЛ В МОА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОГНЕУПОРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ*.

ANEXOS

Anexo A. Productos obtenidos: arena de moldeo (a) y relleno para pintura (b)



Anexo B. Relleno para pinturas antiadherente obtenido, a partir de los rechazos serpentínicos de las empresas Moa Nickel.

